



Výzkum lokálního smrštění u biopolymerů PLA a PLLA

Disertační práce

Studijní program:

Studijní obor:

Autor práce:

Školitel práce:

P2303 Strojírenská technologie

Strojírenská technologie

Ing. Monika Kučerová

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Katedra strojírenské technologie



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Obor 2303V002 Strojírenská technologie

zaměření Zpracování plastů

Katedra strojírenské technologie

Oddělení tváření kovů a plastů

VÝZKUM LOKÁLNÍHO SMRŠTĚNÍ U BIOPOLYMERŮ

PLA A PLLA

**RESEARCH OF A LOCALLY SHRINKAGE OF THE
MATERIAL PLA AND PLLA**

Autor: Ing. Monika Kučerová
Vedoucí katedry: Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Školitel: prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld

Rozsah práce a příloh:

Počet stran:	100
Počet obrázků:	93
Počet tabulek:	12
Počet příloh:	3

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá výzkumem lokálního smrštění biopolymerů v závislosti na vybraných vstřikovacích (rychlostních, tlakových a teplotních) parametrech procesu (dotlak, teplota taveniny, vstřikovací rychlost) a také na geometrii zkušebního tělesa (tloušťka stěny výstřiku). Lokální smrštění je experimentálně zkoumáno v různé vzdálenosti od vtokového ústí (vliv dráhy tečení) na speciální testovací obdélníkové destičce. Pro výzkum byly použity dva biodegradibilní materiály PLA a PLLA, které byly porovnány a vyhodnoceny pomocí statistických a experimentálních metod. Pro porovnání získaných výsledků a verifikací simulačních výstupů byla provedena analýza tečení.

KLÍČOVÁ SLOVA

PLA, PLLA, smrštění, simulace

ABSTRACT

The dissertation thesis deals with research of local shrinkage of biopolymers depending on selected injection speed, pressure and temperature parameters of the process (packing pressure, melt temperature, injection rate) as well as the geometry of the test part (wall thickness of injection part). Local shrinkage is experimentally examined at a different distance from the inlet (influence of the flow path) on a special test rectangular plate. Two PLA and PLLA biodegradable materials were used for the research, which were compared and evaluated using statistical and experimental methods. A moldflow analysis was performed to compare the obtained results and verify the simulation outputs.

KEYWORDS

PLA, PLLA, shrinkage, simulation

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracovala samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že texty tištěné verze práce a elektronické verze práce vložené do IS/STAG se shodují.

19. srpna 2019

Ing. Monika Kučerová

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat panu prof. Dr. Ing. Petr Lenfeldovi za vedení, odbornou pomoc a hodnotné připomínky při zpracování disertační práce.

OBSAH

Seznam použitých zkratk a symbolů.....	8
Úvod	11
Cíle disertační práce	12
1 Současný stav výzkumu v řešené oblasti	13
2 Biopolymery.....	15
2.1. Materiál PLA	16
2.2. Materiál PLLA	17
3 Technologie vstřikování.....	18
3.1. Plastikační fáze	19
3.2. Fáze vstřikování	20
3.3. Dotlaková fáze	20
3.4. Fáze chladnutí	21
3.5. Vstřikovací cyklus v diagramu p-v-T	22
3.6. Simulace vstřikovacího procesu pomocí počítačové analýzy.....	27
4 Smrštění výstřiků.....	28
4.1. Vliv materiálu na smrštění výstřiků.....	28
4.1.1. Tok polymerních tavenin	28
4.1.2. Morfologie polymerů.....	30
4.1.3. Termodynamické vlastnosti plastů	32
4.1.4. Orientace makromolekul	33
4.2. Vliv procesních parametrů vstřikování na smrštění.....	34
4.2.1. Vliv vstřikovacího tlaku	35
4.2.2. Vliv vstřikovací rychlosti	35
4.2.3. Vliv dotlaku	36
4.2.4. Vliv teploty taveniny	37
4.2.5. Vliv teploty formy	37
4.3. Vliv konstrukce výstřiku a formy na smrštění.....	38
5 Experimentální část	40

5.1.	Technologie zpracování materiálů PLA a PLLA	40
5.2.	Vstřikovací forma	41
5.3.	Vstřikovací stroj.....	43
5.4.	Měřicí systém Kistler.....	43
5.5.	Taguchiho Metoda	44
5.6.	Výzkum vlivu technologických parametrů na smrštění.....	45
5.7.	Vliv technologických parametrů na smrštění dle Taguchiho a metody stupně S/N	49
5.8.	Měření průběhu tlaku ve formě	53
5.8.1.	Vyhodnocení tlakových průběhů pro materiál PLA.....	53
5.8.2.	Vyhodnocení tlakových průběhů pro materiál PLLA.....	64
5.9.	Materiálová data pro simulaci.....	74
5.10.	Simulační analýza	77
5.10.1.	Vyhodnocení tlaku.....	81
5.10.2.	Vyhodnocení smrštění	84
6	Diskuze.....	86
6.1.	Diskuze výsledků z hlediska teoretických poznatků	86
6.1.1.	Výrobní smrštění	86
6.1.2.	Taguchiho metoda	87
6.1.3.	Průběh tlaku ve formě.....	88
6.2.	Diskuze výsledků z hlediska praktických poznatků	88
6.3.	Taguchiho metoda.....	88
6.3.1.	Průběh tlaku ve formě.....	89
6.3.2.	Simulace	90
6.4.	Další výzkum	93
	Závěr	94
	Soupis Použité literatury	96
	Seznam příloh	101

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

α		Pevná fáze materiálu
β		Kapalná fáze materiálu
φ	[Pa ⁻¹ s ⁻¹]	Koeficient tekutosti
A	[-]	Bod začátku plnění formy
A		Faktor ovlivňující vstřikovací proces
ABS		Akrylonitril-Butadien-Styren
B	[-]	Poloha místa měření
B	[-]	Bod přepnutí na dotlak
B		Faktor ovlivňující vstřikovací proces
b_i	[-]	Materiálová konstanta
C	[-]	Bod počátku hlavního chlazení
C		Faktor ovlivňující vstřikovací proces
C	[-]	Univerzální konstanta
D	[-]	Bod konce dotlaku
D		Faktor ovlivňující vstřikovací proces
D	[s ⁻¹]	Smyková rychlost
D		Opticky aktivní forma PLA
D_s	[mm]	Průměr šneku
E	[-]	Bod konce pohybu šneku
F	[-]	Bod konce chlazení a počátek vyhození výstřiku
L		Opticky aktivní forma PLA
LA		Lactid acid
L_s	[mm]	Délka šneku
m	[-]	Index tokového chování
MSD	[-]	Střední kvadratická odchylka
n	[-]	Počet míst měření
NOK		Not OK - špatné kusy, nevyhovující jakosti
n_s	[min ⁻¹]	Otáčky šneku
OK		Označení v souhrnu výsledků - optimální průběh
p	[MPa]	Tlak
p_l	[MPa]	Barometrický tlak při pokojové teplotě

p_2	[MPa]	Vstřikovací tlak
p_3	[MPa]	Maximální hodnota vstřikovacího tlaku
p_d	[MPa]	Dotlak
p_i	[MPa]	Vnitřní tlak v dutině formy
p_i	[MPa]	Vnitřní tlak
PLA		Poly-Lactid-Acid
$PLLA$		Poly-L-Lactid-Acid
P_o		Označení v souhrnu výsledků - pozdní přepnutí
P_r		Označení v souhrnu výsledků - předčasné přepnutí
PS		Polystyren
p_v	[MPa]	Vstřikovací tlak
p_z	[MPa]	Zbytkový tlak
p_{zp}	[MPa]	Zpětný tlak
Q_{ps}	[kg h ⁻¹]	Plastikační kapacita
Q_{vs}	[cm ³]	Vstřikovací kapacita
R	[J K ⁻¹ kg ⁻¹]	Materiálová konstanta polymeru
ROP		Polymerace otevřením kruhu
S	[%]	Smrštění
S/N	[-]	Stupeň k vyjádření znaků jakosti odchýlených od požadované hodnoty.
T	[°C], [K]	Teplota
t	[s]	Čas
t		Vrstvy toku materiálu
T_m	[°C], [K]	Teplota tání krystalického podílu
t_d	[s]	Čas dotlaku
T_f	[°C], [K]	Teplota viskózního toku
T_f	[°C], [K]	Teplota formy
T_g	[°C], [K]	Teplota zeskelnění
t_{chl}	[s]	Čas chlazení
T_k	[°C], [K]	Teplota komory
T_m	[°C], [K]	Teplota tání
T_m	[°C], [K]	Teplota temperačního media
t_m	[s]	Čas manipulace

t_{pl}	[s]	Čas plastikace
$T_{př}$	[°C], [K]	Přechodová teplota
t_{s1}	[s]	Čas uzavření vstřikovací formy
t_{s2}	[s]	Časová prodleva mezi přisunutím vstřikovací jednotky a začátkem vstřiku
t_{s3}	[s]	Čas otevření vstřikovací formy
T_t	[°C], [K]	Teplota taveniny při výstupu z trysky
T_{tr}	[°C], [K]	Teplota trysky
t_v	[s]	Čas vstřiku
v	[m ³ kg ⁻¹]	Měrný objem
v_s	[cm ³ s ⁻¹]	Vstřikovací rychlost
X	[m]	Rozměr formy
X_Y	[m]	Změřený rozměr vzorku v daném místě
η	[Pa s]	Dynamická viskozita
π	[MPa]	Vnitřní tlak vznikající jako důsledek vnitřních sil ve formě
τ	[Pa]	Smykové napětí
Φ	[s ⁻¹]	Koeficient tekutosti
ω	[m ³ kg ⁻¹]	Měrný objem polymeru při 0 K

ÚVOD

V posledních letech nastal velký rozvoj výroby a použití polymerních materiálů v různých oblastech průmyslu. Složité výrobky, které byly dříve vyráběny z kovu, nyní nahrazují výrobky z polymerů. Toto má za následek velký hospodářský význam, ale i velký dopad na životní prostředí. Původně byl vývoj polymerních materiálů zaměřen na výrobu materiálů s co nejlepšími fyzikálními a mechanickými vlastnostmi, tudíž na materiály s velkou stálostí a odolností až do takové míry, že materiály jsou natolik odolné, že jejich likvidace trvá i stovky let. Toto je příčinou narůstajícího množství odpadů z plastů.

Z tohoto důvodu dnes výroba plastových materiálů směřuje do oblasti biomateriálů či biodegradovatelných materiálů. Ačkoliv je tato oblast oproti syntetickým materiálům v počátcích, jedná se o materiály vykazující vlastnosti podobné vlastnostem běžně používaných materiálů.

Technologie vývoje a použití biodegradibilních materiálů se v dnešní době urychluje a v budoucnosti by tyto materiály mohly nahradit stávající. A protože jedním z důležitých parametrů plastových dílů je rozměr, zabývá se tato disertační práce smrštěním materiálů PLA a PLLA. Z tohoto důvodu je v disertační práci analyzováno lokální smrštění obou zmíněných materiálů pomocí vzorků vyráběných ve zkušební formě. Tyto materiály právě patří do oblasti biodegradibilních materiálů a užitím správné technologie mohou být vyrobeny díly pro nejrůznější použití, tj. zejména pro spotřební průmysl.

CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Disertační práce se zabývá výzkumem lokálního smrštění u zkušebních vzorků materiálů PLA a PLLA. Tyto materiály se dnes používají jak v obalové technice, lékařství, tak i v automobilovém průmyslu.

Cíle disertační práce se dají shrnout do následujících bodů.

- Rešerše současného stavu
- Popis poznatků pro oblast smrštění a biodegradibilních materiálů
- Statistika experimentu včetně přípravy zkušebních těles v závislosti na rychlostních, tlakových, teplotních a geometrických parametrech
- Provedení simulace
- Provedení experimentálních měření
- Verifikace hodnot z numerického a experimentálního měření
- Vyhodnocení a doporučení parametrů pro zpracování materiálů PLA a PLLA

1 SOUČASNÝ STAV VÝZKUMU V ŘEŠENÉ OBLASTI

Pro stanovení cílů a podmínek výzkumných činností byla v první fázi provedena rešerše odborných článků a publikací týkajících se vybraných materiálů a jejich smrštění. Důležitými výrazy pro tento krok jsou PLA – polylactidacid a PLLA Poly- L- lactid acid.

Mezi studované články patřily „Study on Shrinkage of Injection Molding Biodegradable materials“ vydaný v Materials Science Forum v roce 2006. Tento článek se zabývá biodegradibilními materiály a to materiálem NatureWork PLA 3001D a Biomax WB200. Cílem článku bylo vyhodnotit nejvhodnější hodnoty čtyř technologických parametrů pro získání minimálního smrštění. Ty byly vybrány pomocí Taguchiho metody. A vliv těchto parametrů na smrštění byl hodnocen pomocí metod ANOVA a S/N stupně. Výsledkem bylo také posouzení vlivu ve dvou směrech X a Z [2]

Dalším článkem byl příspěvek „Poly- Lactic Acid: Produciton, Applications, Nanocomposites, and Release Studies“ z roku 2010 zabývající se přípravou, využitím a termální stabilitou materiálu PLA z důvodu jeho využití v potravinářství, kde materiál nachází své uplatnění jako obalový materiál. Obecným výsledkem tohoto článku je rozbor využití těchto materiálů v dalších letech a přizpůsobení jejich vlastností pomocí nanotechnologií [3].

O samotném využití materiálů PLA a PLLA existuje mnoho odborných prací, mezi které patří odborný článek z roku 2016 „Warpagend Shrinkage Optimatization of Injection-Molded Plastic Spoon Parts for biodegradable Polymers Using Taguchi, ANOVA and Artificial Neural Network Methods“ [4]. Tento článek popisuje materiálovou analýzu a simulaci vstřikovacího procesu pomocí softwaru Moldflow firmy Autodesk. Tato analýza byla použita za účelem snížení propadů a deformací.

Vliv vstřikovacích parametrů na smrštění materiálu PLA je studován v odborné práci „Three-Dimensional Simulation of the Shrinkage Behavior of Injection-Molded Poly Lactic Acid (PLA): Effects of Temperature, Shear Rate and Part Thickness“ pomocí 3D simulace v programu Moldflow od firmy Autodesk. Výsledky ukázaly, že na smrštění má vliv jak teplota, tak i smyková rychlost a to tak, že čím vyšší je teplota a smyková rychlost, tím je větší i lineární smrštění. [5]

Další studií zabývající se simulací vlastností a optimalizace procesu vstřikování je „Simulation of mechanical behavior and optimization of simulated injection molding

process for PLA based antibacterial composite and nanocomposite bone screws using central composite design“. Tato studie byla zaměřena na optimalizaci vstřikovacího procesu za účelem snížení smrštění a propadů u tří kostních šroubů z materiálu PLA. Jako faktory ovlivňující smrštění byla zkoumána teplota chladicího média, formy, taveniny. Mezi dalšími vstřikovací tlak, dotlak a čas vstřiku. Pro určení vlivu parametrů byla použita metoda plochy odezvy. [6] Metoda plochy odezvy je soubor statistických a matematických technik vhodných pro vývojové, inovační a optimalizační procesy [7].

Mnoho studií se zabývá i výrobou a vlastnostmi vláken z materiálů PLA. Jedna z nich je popsána v článku „Structure–property relationship for poly(lactic acid) (PLA) filaments: physical, thermomechanical and shape memory characterization“, kde jsou popsány zkoumané fyzikální termomechanické a tvarové vlastnosti dvou různých vzorků PLA materiálu. [11]

Studie v článku „Application of Taguchi Method in the Optimization of Processing Parameters for Green Fiber“ se zaměřila na optimalizaci parametrů pomocí Taguchiho metody při výrobě vláken z materiálu PLA. Výsledkem bylo vyhodnocení nejvhodnějších parametrů pomocí S/N stupně. [8]

Vlákny z materiálu PLA se také zabývá studie „Thermal and mechanical characteristics of polylactide filaments drawn at different temperatures“. [9]

Štěpením materiálu PLA se zabývá studie popsána v článku „Synthesis and characterization of poly(lactic acid) based graft copolymers“, kdy roubované kopolymery PLA byly analyzovány pomocí různých monomerů či polymerů, například chitosan, celulóza, dextran atd. [10]

Kromě využití samotných materiálů PLA a PLLA dochází také k výzkumu a využití jejich směsí. V dnešní době je materiál PLA používán nejen v obalovém průmyslu, potravinářství, k výrobě oblečení, ve směsích, ale také vedle materiálu ABS jako nejpoužívanější materiál pro 3D tisk. Díky svým vlastnostem se jedná o univerzální materiál vhodný i pro tisk velkých objektů. [1], [12]

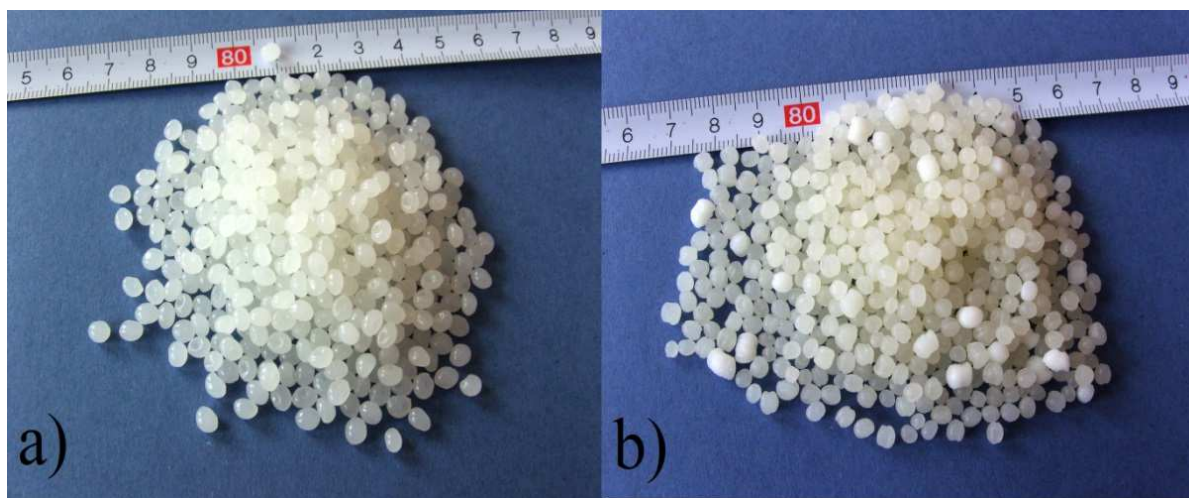
V posledních letech byla spotřeba těchto materiálů limitována jejich cenou, která postupně klesá a díky tomu se dostává do popředí jejich hlavní výhoda a to rozložitelnost.

2 BIOPOLYMERY

Polymery jsou chemické látky s mnoha různými vlastnostmi, které ve svých makromolekulách zpravidla obsahují atomy vodíku, kyslíku, uhlíku, často dusíku, chloru i dalších prvků. Díky stavbě molekul v polymeru mají tyto materiály různé vlastnosti. Dle původu mohou být syntetické nebo přírodní a liší se od sebe tím, že biopolymery mají v řetězci vždy obsažen také kyslík nebo dusík.

Biopolymery jsou vysokomolekulární organické látky produkované biochemickými reakcemi u rostlin, zvířat a mikroorganismů. Tyto materiály jsou biologicky rozložitelné, tedy u nich dochází k degradaci působením mikroorganismů a výsledné produkty degradace jsou oxid uhličitý, případně metan, voda a zbytková biomasa. Samotnou degradaci ovlivňuje prostředí a složení materiálu. Proces rozkládání se nazývá mineralizace. Biodegradibilní proces se skládá ze dvou částí a to depolymerace a následně mineralizace. Díky tomu jsou součástí přírodních cyklů. [13], [14], [15], [16]

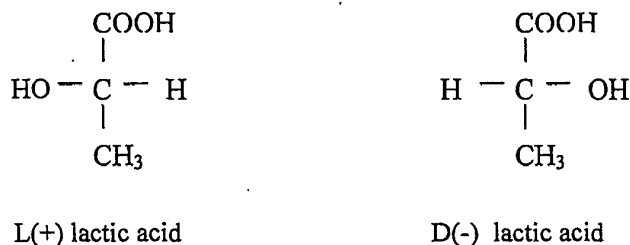
Biopolymery můžeme dále rozdělit do dvou skupin, kdy první skupinu tvoří biopolymery přírodního původu a druhou skupinu tvoří biopolymery označované jako syntetické. Biopolymery lze syntetizovat z tzv. biomolekul monomerů, které nevykazují parametry vysokomolekulárních látek. Mezi biopolymery přírodního původu řadíme polysacharidy, proteiny a polyestery produkované mikroorganismy. Mezi biopolymery patří i zkoumané materiály PLA a PLLA (granuláty jsou na obr. 1), jejichž popis je uveden v následujících podkapitolách. [15]



Obr. 1 Granuláty materiálů PLA (a) a PLLA (b)

2.1. MATERIÁL PLA

Kyselina polylaktidová–polymléčná (PLA) je termoplast ze skupiny bio-alifatických polyesterů. Tento termoplast je náchylný k hydrolýze, to znamená, že má schopnost být v životním prostředí postupně štěpen vlivem povětrnostních účinků a mikrobiálních procesů na oligomery nebo na samotný monomer. Je to tedy materiál biodegradibilní, biokompatibilní a netoxický. PLA lze jako jeden z mála polymerů řízeně odbourávat i chemicky zpět na monomer. Základní jednotka LA (lactid acid) materiálu PLA, může být získávána z přírodních zdrojů fermentací, tak i jako ropný produkt. Také může být získávána ze zemědělských produktů nebo jako produkt z odpadů (např. celulóza, syrovátka). Lactid acid se často používá jako aditiva v potravinářském průmyslu. Příprava vysoce molární hmoty LA může být pomocí ring-opening polymerace (ROP) dehydrovaného dimeru, polymerace za otevření kruhu, nebo dilactidu. Další možná příprava je polykondenzací a v neposlední řadě polykondenzací spojenou s LA prepolymery. Podle přípravy makromolekuly se PLA vyskytuje ve dvou opticky aktivních formách, tj. L a D – lactid acid stereoizomeriích, obr. 2. Obě formy vykazují semikrystalickou strukturu. [15], [17]



Obr. 2 Opticky aktivní formy LA [17]

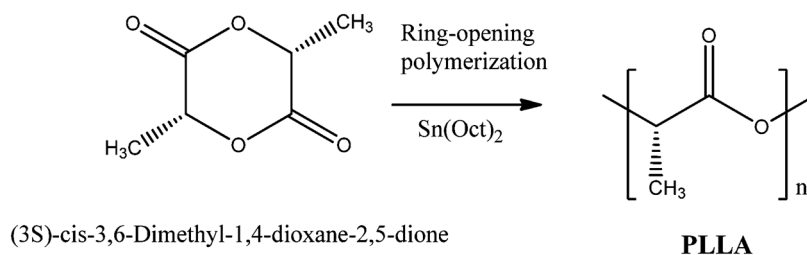
Pro dosažení vyšší teplotní stability je nutné polymer dále modifikovat. PLA může vykazovat semikrystalickou strukturu, kdy krystalizace nastává při teplotě 80-100 °C. Při rychlém ochlazení vzorků vykazuje také amorfní strukturu. Tento polymer se vyznačuje průhledností. Jedná se o materiál tuhý, ale zároveň křehký. Pomocí plastifikačních činidel lze dosáhnout zvýšení tažnosti a houževnatosti. Díky tomu má velmi rozmanité využití, zejména v biomedicínských aplikacích. Také se využívá k výrobě textilních vláken nebo potravinových obalů. Mezi další vlastnosti patří teplota skelného přechodu homopolymeru PLA, která je 55-59 °C a bod tání 174-184 °C. Může se zpracovávat vyfukováním,

vytlačováním, tvářením a vstřikováním, což je technologie, která byla aplikována pro samotný výzkum. [18], [19]

Pro výzkumné činnosti byl použit biopolymer PLA firmy NatureWorks® Biopolymer 3251D, Injection Molding Process Guide popsaný v příloze P1 [20]. [21]

2.2. MATERIÁL PLLA

PLLA neboli Poly-L-Lactid-Acid je polymer připravený ROP (Ring-opening polymerization) polymerací, který je zobrazen na obr. 3. Tento materiál patří do skupiny izotaktických polymerů. To určuje orientaci jeho řetězců. Tyto řetězce jsou uspořádány do semikrystalické struktury ve dvou formách. Semikrystalická fáze činí cca 37 %. Mezi vlastnosti tohoto materiálu patří např. teplota tání 162 – 167 °C a vykazuje velmi dobré mechanické vlastnosti. V přírodě degraduje za dobu delší než tři roky. Tento materiál je často používán pro medicínské účely. [5]

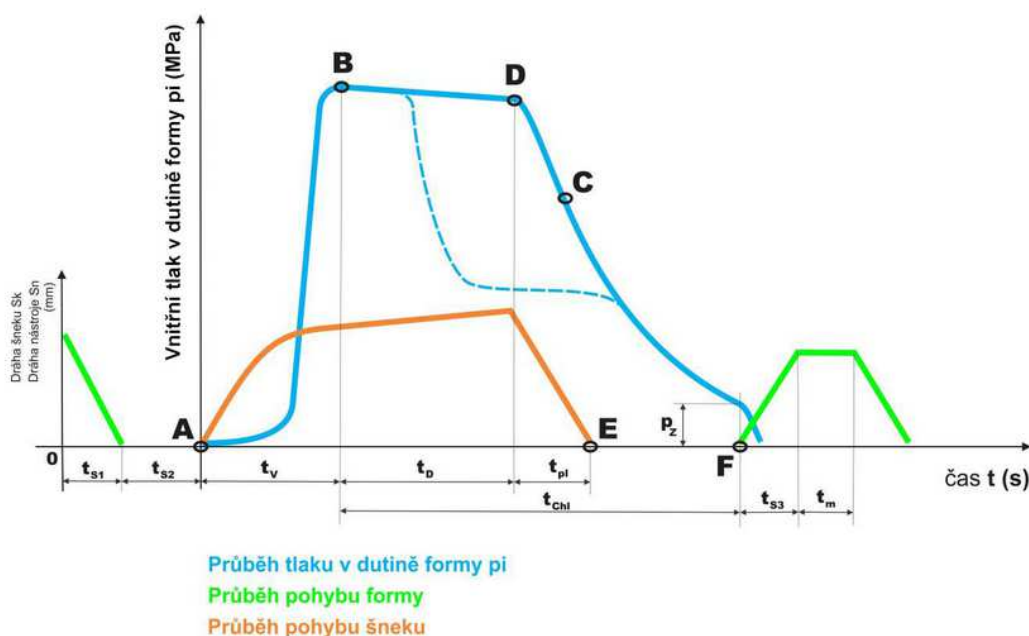


Obr. 3 Chemický vzorec PLLA [21]

Pro výzkumné činnosti byl použit materiál Synterra® PLLA 1010, Version: 2011-12 popsaný v příloze P2 [22]. Zpracovávání probíhalo pomocí vstřikování.

3 TECHNOLOGIE VSTŘIKOVÁNÍ

Složité díly z kovových materiálů jsou dnes nahrazovány díly z polymerů, které mohou dosahovat stejných mechanických a pevnostních vlastností. Ke zpracování polymerů můžeme použít několik technologií. A to například odlévání plastů, technologii vytlačování (extruzi), tvarování, lisování atd. Jednou z nejvíce používaných metod je technologie vstřikování. Počátky této technologie spadají do konce 19. století [13]. Vstřikováním můžeme vyrábět konečné výrobky či polotovary nebo díly pro další kompletaci. Aplikací technologie vstřikování u technicky náročnějších dílů můžeme uspořit čas pro montáž sestavy, jelikož je díl vyroben jako celek. Obecně vstřikovat můžeme jak syntetické, tak přírodní materiály, termoplasty, reaktoplasty i elastomery. [13]



Obr. 4 Průběh vnitřního tlaku v dutině během vstřikování [32]

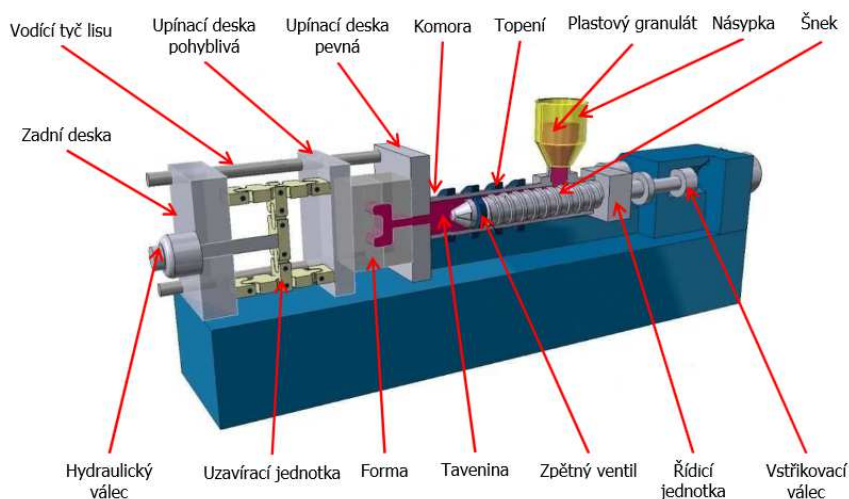
Z hlediska zpracovávaného plastu rozdělujeme vstřikovací cyklus na 4 hlavní fáze, kterými jsou plastikační fáze, fáze vstřikování, dotlaková fáze a fáze chlazení.

Pro každý materiál může být vstřikovací cyklus vyjádřen jako závislost tlaku v dutině formy na čase. Tento tlak se nazývá vnitřní tlak a značí se p_i . Na obr. 4 je zobrazen průběh jednotlivých fází vstřikovacího cyklu. Diagram popisuje závislost již zmíněného vnitřního tlaku v dutině formy p_i na čase. Čas uzavření a otevření vstřikovací formy představují časy t_{s1} , t_{s3} . Časový úsek t_m je doba vyjmutí výstřiku. t_{s2} je časová prodleva mezi přisunutím vstřikovací jednotky a začátkem vstřiku. V bodě A začíná plnění formy taveninou materiálu

až do bodu *B*. Tento úsek mezi body *A* a *B* je právě fáze vstřikování. Mezi body *B* a *D* je doba dotlaku. Mezi body *D* a *E* je čas plastikace a čas chlazení je mezi body *B* a *F*.

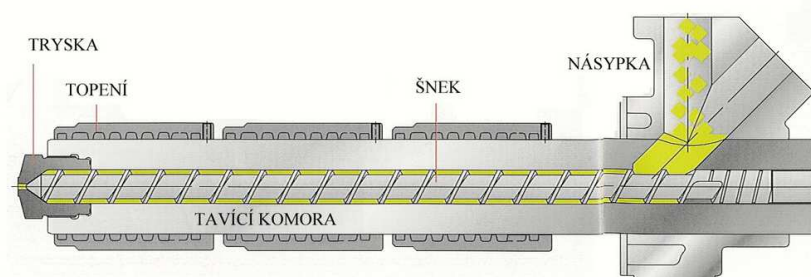
3.1. PLASTIKAČNÍ FÁZE

Při této fázi je dle požadavků vysušený materiál, nejčastěji ve formě granulí, nasypán do násypky vstřikovacího stroje zobrazeného na obr. 5.



Obr. 5 Vstřikovací lis [35]

Z této násypky dále vstupuje do komory zobrazené na obr. 6, kde pomocí tření a tepla dochází ke vzniku taveniny. Teplo vzniká z topných pásem a také ze tření mezi hmotou, komorou a šnekem. Při nabírání materiálu se šnek otáčí, a současně ustupuje zpět v axiálním směru.



Obr. 6 Detail komory [26]

Doba plastikace t_{pl} je tedy čas potřebný k tomu, aby došlo k zplastikování nadávkovaného materiálu, k zhomogenizování a umístění dávky taveniny před čelo šneku. Teploty pro nastavení jednotlivých topných pásem udává výrobce granulátu v materiálovém listu. Tyto teploty se liší v závislosti na typu materiálu [13], [30]. Při plastikaci je také nutné

nastavit zpětný tlak. Objem taveniny materiálu musí být tak velký, aby došlo k zaplnění celého objemu dutiny vstřikovací formy, vtokové soustavy a objemu polštáře. Tento celkový objem se nazývá zdvih stroje. Všeobecně se udává, že by měl tvořit čtyřnásobek průměru šneku. Tato fáze probíhá vždy během fáze chlazení, tudíž nemá vliv na celkový čas výrobního cyklu. [13], [30]

3.2. FÁZE VSTŘIKOVÁNÍ

Při samotném vstřiku se šnek neotáčí, šnek se pouze posouvá dopředu v axiálním směru a vstřikuje taveninu přes trysku a vtokovým systémem do dutiny formy. Tím dochází postupně k zaplnění celého objemu dutiny formy homogenní taveninou. Základní technologické parametry plnicí fáze jsou vstřikovací tlak, teplota taveniny a formy a vstřikovací rychlost. Čas vstřikovací fáze závisí na geometrii, velikosti a složitosti výstřiku, násobnosti, typu vtokového systému, vstřikovacím tlaku, rychlosti, teplotním profilu a na reologických vlastnostech materiálu. Dutina formy se plní nejprve objemově, potom se rychlost plnění zmenšuje a narůstá tlak plnění až na maximální hodnotu. [13], [30]

Z praxe je zřejmé, že určité hodnotě vstřikovací rychlosti odpovídá určitý tlakový proces pro zvolený materiál, proto nelze nastavovat velkou vstřikovací rychlost, když je zapotřebí nízký tlak [36]. Cílem plnicí fáze je stejnoměrné plnění dutiny formy a zabránění předčasnému zatuhnutí taveniny.

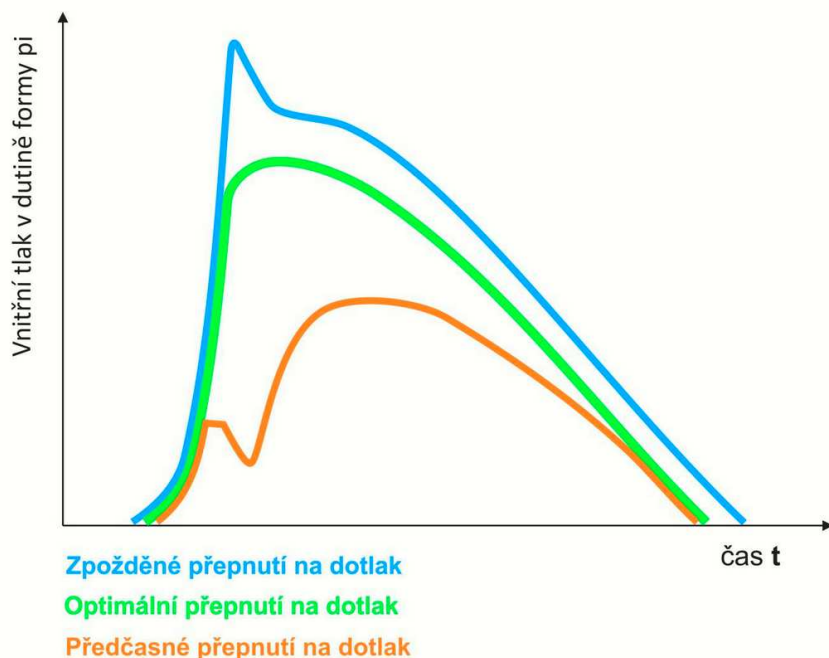
V důsledku plnění (tečení taveniny) může dojít k orientaci makromolekul taveniny ve výstřiku, což má následné dopady na rozměrové parametry výrobku. V posledním časovém úseku plnění dochází k přepnutí na dotlak. V této chvíli je nutné snížit vstřikovací rychlost (tlak), aby nevznikla ve formě tlaková špička.[32], [34]

3.3. DOTLAKOVÁ FÁZE

K eliminaci objemového smrštění během plnění se používá fáze dotlaku. Dotlak se používá za účelem dotlačení dalšího objemu taveniny do dutiny formy. Dotlakovou fází ovlivňuje tlakový průběh, jeho doba, teplota formy a taveniny. Na obr. 4 v bodě B dochází k přepnutí na dotlak. Toto přepnutí může být odvozeno od více podmínek, např. přepnutí na dotlak může být řízeno podle objemu, času nebo nastavené hodnoty vstřikovacího tlaku. Pokud dojde k tomuto přepnutí na dotlak před nebo za bodem B, tak dochází k jevům, uvedeným na obr. 7.

Dotlak se rozděluje na izobarický a izochorický. Abychom mohli eliminovat smrštění dotlakem, musí před čelem šneku zůstat určitý objem roztaveného plastu neboli materiálový polštář, na který bude šnek působit svým čelem. Objem materiálového polštáře nesmí být moc velký (obvykle kolem 10 až 15 % objemu, tedy méně než jednonásobek průměru šneku D_s), aby nedocházelo k tepelné degradaci hmoty a neekonomické výrobě výstřiků. [13], [32], [36]

Pro optimální stanovení přepnutí na dotlak je dobré využít polohu šneku, hmotnost výrobku nebo tlak naměřený pomocí čidel umístěných v dutině formy. Hodnotu dotlaku je nutné nastavit tak, aby nedošlo buď k tlakové špičce anebo k nedostatečné kompenzaci objemu (propadliny).



Obr. 7 Vliv dotlaku na průběh vnitřního tlaku v dutině během vstřikování [32]

Pokud dojde k předčasnému ukončení dotlaku před zatuhnutím vtokového ústí, mohou na výstřiku vznikat propadliny. Naopak příliš pozdní přepnutí vstřikovacího tlaku na dotlak omezuje pohyblivost makromolekul během stabilizace a tím vyvolává vnitřní napětí v tuhnoucí tavenině.

3.4. FÁZE CHLADNUTÍ

Fáze chladnutí je proces, kdy ve tvarové dutině probíhá tuhnutí vstříknutého materiálu. Tato fáze začíná již během vstřikování, kdy dojde ke kontaktu taveniny se stěnou formy a pokračuje po celou dobu dotlaku. Fázi chladnutí ovlivňuje především tloušťka stěn

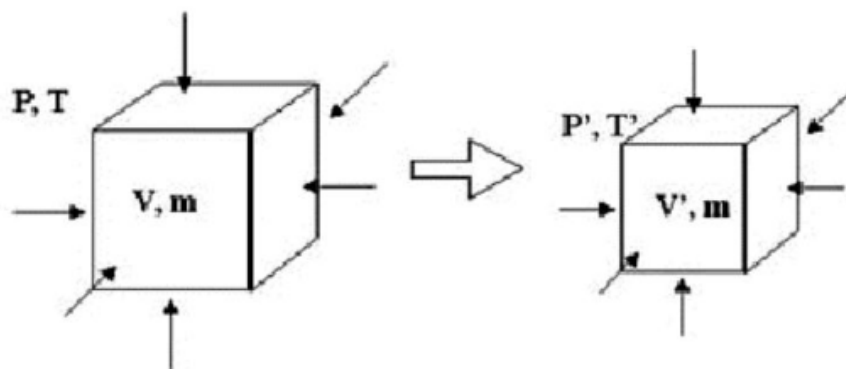
výstřiku, průběh dotlaku, teplota taveniny, teplota formy a způsob chlazení. Během této fáze klesá tlak v dutině formy až na hodnotu zbytkového tlaku (viz obr. 4). Pokud je zbytkový tlak příliš velký, je nutné použít zvýšené vyhazovací síly. Tím může následně dojít k deformaci výstřiku.

Fáze chlazení tvoří nejdelší část vstřikovacího cyklu. Celkový čas chlazení t_{chl} je ovlivněn výběrem materiálu, tloušťkou výstřiku, teplotou formy a teplotou taveniny. [32], [36]

Na obr. 4 čas chlazení t_{chl} začíná v bodě B a končí v bodě F . Poté dochází k vyhození výstřiku z formy. V bodě C je předpokládáno zatuhnutí vtoku. V bodě F je naznačen zbytkový tlak p_z . Cyklus je ukončen vyjmutím výstřiku a uzavřením formy. Při sériové výrobě se následně celý proces opakuje. [32]

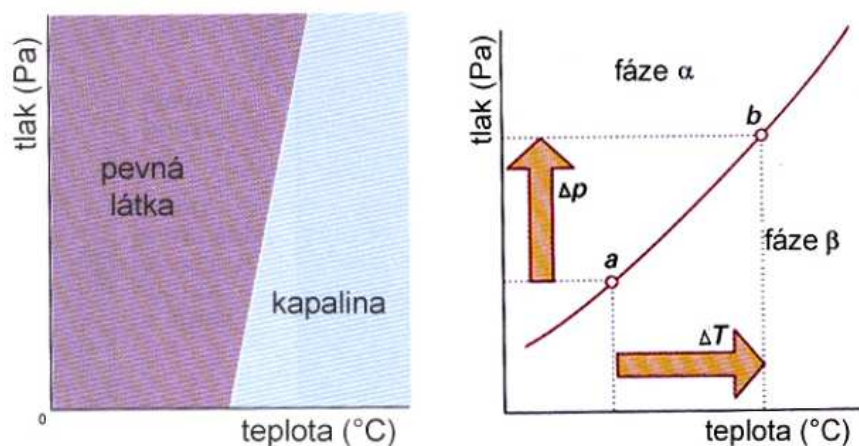
3.5. VSTŘIKOVACÍ CYKLUS V DIAGRAMU P-V-T

Vstřikovací cyklus můžeme popsat také pomocí stavových termodynamických veličin, tj. tlaku p , měrného objemu v (převrácená hodnota hustoty) a teploty materiálu T . Na obr. 8 je znázorněna stavová změna systému.



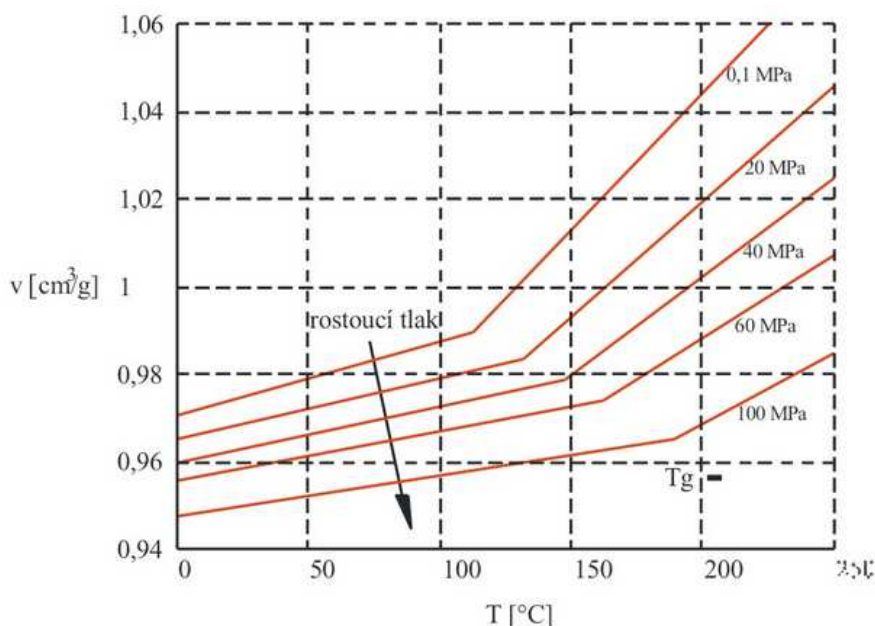
Obr. 8 Stavová změna systému p - v - T [27]

Pro jednosložkový systém se nejčastěji používají diagramy p - T či p - V . Na obr. 9 jsou zobrazeny dvě jednotlivé fáze, tj. α -pevná fáze a β -kapalná fáze materiálu, které odděluje koexistenční křivka. Pokud máme soustavu, kde jsou dvě fáze v rovnováze, a budeme působit tlakem, dojde k porušení rovnováhy. K obnovení rovnováhy dojde změnou teploty. To značí, že mezi diferencemi Δp a ΔT existuje přímá souvislost. [14], [36]



Obr. 9 Typická koexistenční křivka tání pro soustavu pevná látka – kapalina a koexistenční křivka rovnováhy dvou fází [37]

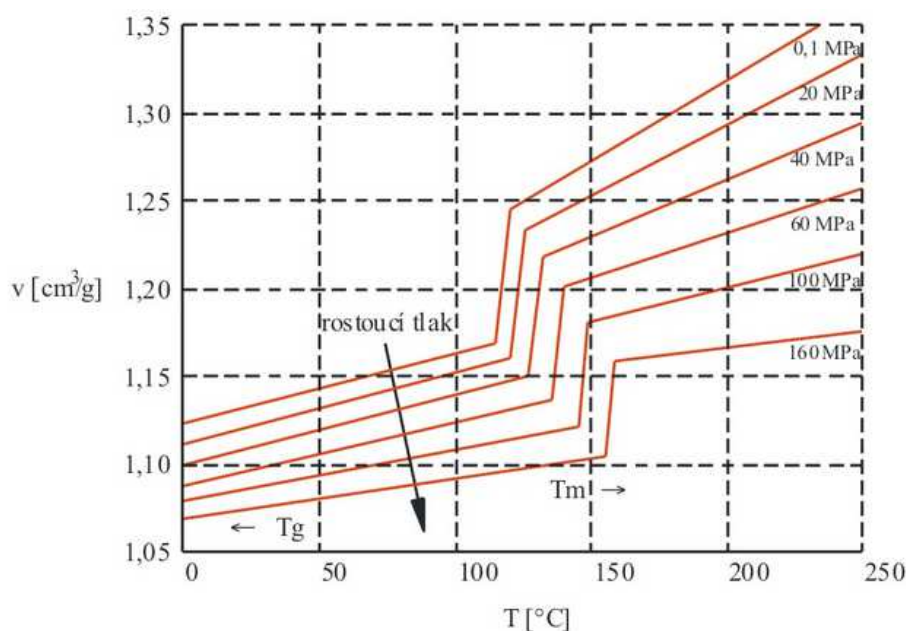
U vícesložkových systémů existují např. p - v - T diagramy. Základní tvar p - v - T diagramů pro amorfni a semikrystalické plasty je ukázán na obr. 10 a obr. 11. Významným vlivem působícím na smrštění ve výstřiku je účinek termodynamických procesů v tavenině. Tento vliv a vstřikovací cyklus lze popsat pomocí tlaku, měrného objemu a teploty taveniny polymeru. Ze závislosti zmíněných veličin lze připravit p - v - T diagram. Je nutné zmínit, že p - v - T diagram neobsahuje časovou závislost. [36], [51]



Obr. 10 Diagram p - v - T pro amorfni termoplast [32]

Stavové veličiny se v různých místech výstřiku liší a jsou ovlivněny materiálem, tvarem výstřiku a tloušťkou stěn, vstřikovacím tlakem a dotlakem, vstřikovací rychlostí,

teplotou taveniny a teplotou formy. Změny stavových veličin ovlivňují vznik nadmolekulární struktury materiálu a také ovlivňují hmotnost a rozměry výstřiku.

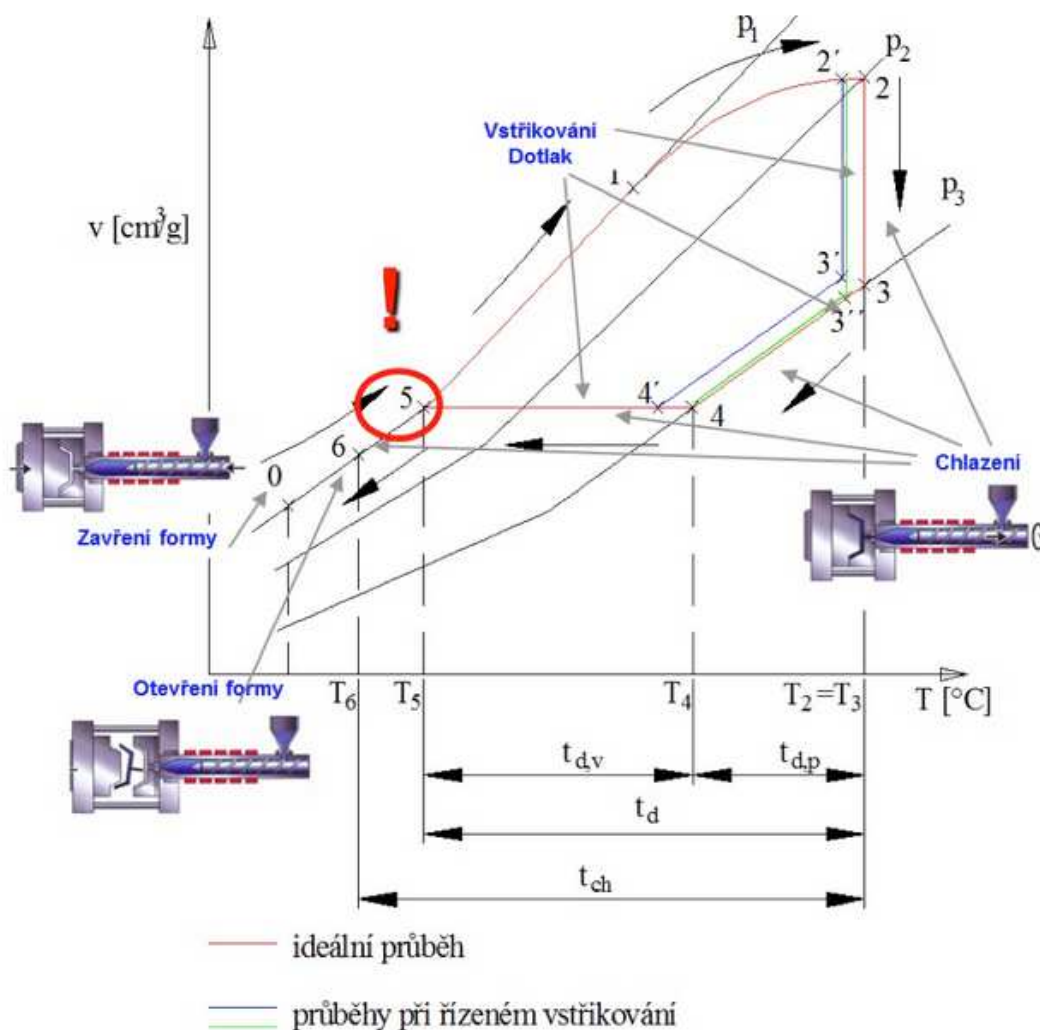


Obr. 11 Diagram p - v - T pro semikrystalický termoplast [32]

Pomocí p - v - T diagramu můžeme řídit samotný vstřikovací proces, jak je zobrazeno na obr. 12. Tento způsob patří k moderním metodám řízení zpracování plastů a je aplikován u současných strojů, které jsou řízeny mikroprocesory. V prvním kroku dojde k uzavření formy a poté následuje začátek vstřikovacího procesu (bod 0). Poté dochází k ohřevu a plastikaci materiálu v komoře vstřikovacího stroje při barometrickém tlaku (bod 1), kde již probíhá tavení a nastává komprese materiálu a začíná narůstat tlak až na hodnotu vstřikovacího tlaku p_2 . Vlivem topných pásem a tření stále vzrůstá i teplota taveniny (bod 2). [32], [36]

Prudkým nárůstem tlaku od bodu 2 vyvolaným axiálním pohybem šneku začíná vstřikovací fáze. Pro zjednodušení zde uvažujeme děj izotermický. Poté tlak stoupá až na svou maximální hodnotu p_3 v bodě 3. Když dojde k zaplnění tvarové dutiny vstřikovací formy, dojde ke stlačení taveniny a v návaznosti na to vstřikovací rychlost okamžitě poklesne. Nyní dochází k přepnutí na dotlak. Ten probíhá ve dvou fázích. V první fázi mezi body 3 a 4 se jedná o dotlak izobarický, zajišťující doplnění objemu tvarové dutiny formy, kterému přísluší hodnota tlaku p_3 . V druhé fázi se v bodě 4 změnil izobarický dotlak na dotlak izochorický, který kompenzuje objemové změny, smrštění za současného chlazení taveniny plastu v dutině vstřikovací formy. Druhá fáze dotlaku končí v bodě 5, kde tlak dosáhne

počáteční hodnoty p_1 a teploty T_5 . Konec druhé fáze v bodu 5 zásadně ovlivňuje kvalitu výstřiku a jeho výsledné vlastnosti (hmotnost, smrštění a tedy rozměry). [32], [36]



Obr. 12 Vstřikovací cyklus v p - v - T diagramu [32]

Samotné chlazení výstřiku probíhá ve formě již ve fázi vstřikování, kdy se tavenina dotkne stěny vtokového ústí a pokračuje dále i ve fázi dotlaku. V této části působí tlak a zároveň dochází ke chlazení a postupně dochází ke klesání tlaku až na hodnotu zbytkového tlaku. K samotnému chladnutí výrobku v dutině formy dochází mezi body 5 a 6 a to již bez působení dotlaku. Vstřikovací cyklus je dokončen bodem 6, kde se forma otevře a výstřik je vyhozen ze vstřikovací formy. Následně výrobek chladne již mimo vstřikovací formu a postupně dosáhne teploty okolí, tedy výchozího bodu 0. [32], [36]

Diagram p - v - T lze graficky zobrazit na základě rozdílných matematických rovnic. První možností je použití modifikované stavové van der Waalsovi rovnice:

$$(p + \pi)(v - \omega) = RT, \quad (1)$$

kde p - vnější tlak [Pa], π - vnitřní tlak vznikající jako důsledek vnitřních sil ve hmotě [Pa], v - měrný objem polymeru [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$], ω - měrný objem polymeru [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$] při 0 K, T - termodynamická teplota [K], R - materiálová konstanta polymeru obdobná individuální plynové konstantě [$\text{J K}^{-1} \text{kg}^{-1}$].

Abychom mohli aplikovat tuto stavovou rovnici, je nutné znát hodnoty R , ω , a π . Tyto tři uvedené konstanty mají v jednotlivých bodech rozdílné hodnoty vlivem skokově se měnících vlastností plastů v závislosti na teplotě a tlaku podle toho, ve které teplotní oblasti se polymer právě nachází. V souřadnicích měrný objem – teplota se bude jednat o přímky znázorňující izobary. A v závislosti na teplotě vykazují zlomy, které jsou spjaty s přechodovými teplotami. Pro amorfnní termoplasty jsou důležité oblasti nad a pod teplotou zesklenní T_g . U semikrystalických plastů rozlišujeme při výpočtech čtyři oblasti. A to oblast pod T_g , dále oblast nad T_g až do teploty asi 40°C pod teplotu tání T_m . Třetí oblastí je rozmezí teplot 40°C pod T_m až k hranici T_m . Poslední oblastí je teplotní pásmo nad T_m . [26], [38]

Van der Waalsova rovnice neodpovídá přesně realitě, a to díky ostrým zlomům izobar. Z tohoto důvodu se používá přesnější rovnice Taitova. U této rovnice jsou přímky izobar mírně zaobleny, aby se co nejvíce blížily skutečnosti. Taitova rovnice má následující tvar:

$$v(T, p) = v_0(T) \left\{ 1 - C \cdot \ln \left(1 + \frac{p}{B(T)} \right) \right\} + v_1(T, p) \quad (2)$$

Kde dále platí:

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1m} + b_{2m} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3m} \cdot e^{-b_{4m} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= 0 \end{aligned} \right\} \text{pro } T > T_{př} \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} v_0(T) &= b_{1s} + b_{2s} \cdot \bar{T} \\ B(T) &= b_{3s} \cdot e^{-b_{4s} \cdot \bar{T}} \\ v_1(T, p) &= b_7 \cdot e^{(b_8 \bar{T} - b_9 \cdot p)} \end{aligned} \right\} \text{pro } T < T_{př} \quad (4)$$

kde p značí tlak [Pa], v - měrný objem polymeru [$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$], T je termodynamická teplota [K], $T_{pr} = b_5 + b_6 \cdot p$ je přechodová teplota [K], $\bar{T} = T - b_5$ [K], $C = 0,0894$ je univerzální konstanta [-], b_i jsou materiálové konstanty pro daný polymer zjistitelné z příslušných materiálových listů [-]. [26], [38]

3.6. SIMULACE VSTŘIKOVACÍHO PROCESU POMOCÍ POČÍTAČOVÉ ANALÝZY

Ve firmách a dalších pracovištích zabývajících se vstřikovacím procesem bývá trendem používat simulace k analýze vstřikovacího procesu. Tyto simulace obsahují nástroje, které pomáhají optimalizovat procesní podmínky pro samotnou výrobu tak, aby nedocházelo k tvorbě potencionálních vad, problémům v jednotlivých fázích procesu a také lze predikovat smrštění v jednotlivých částech výstřiku. Tyto simulace také snižují náklady na prototypové formy.

Zpřesnění simulací dosáhneme použitím materiálových dat, popřípadě připravením vhodných dat pro používaný materiál. Většina programů má interní databázi s daty materiálů, které popisují jejich fyzikální a reologické chování. [42], [43], [44]

Pro simulaci vstřikovacího procesu se používají softwary jako je např. Autodesk Moldflow, CadMold atd. V disertační práci byl použit software Moldex3D.

Software Moldex3D

Společnost Moldex3D byla založena v roce 1995 jako CoreTech System Co, Ltd s cílem nabídnout software pro analýzu a detailní simulaci vstřikování. Všechny produkty jsou založené na objemové hybridní síti a vysoce výkonné metodě konečných objemů. Software se používá k simulaci procesu vstřikování, vstřikovacího procesu za použití plynu, multi-komponentnímu vstřikování, vstřikování se zálistky a k simulaci procesu enkapsulace mikročipů. Je vybaven generátorem sítí pre-procesorem Moldex 3S Mesh, který podporuje různé varianty sítí. [45]

4 SMRŠTĚNÍ VÝSTŘIKŮ

Technologický proces vstřikování je složitý tepelně mechanický proces, který ovlivňuje mnoho faktorů. Na těchto faktorech se podílí stroj, forma, parametry procesu a vybraný polymer. Průběhem změny objemu a rozměru výstřiku je ovlivňováno výsledné smrštění v jednotlivých směrech. Smrštění výstřiku se projevuje hlavně v průběhu tuhnutí taveniny polymeru bez tlaku a v čase následujícím po vyjmutí výstřiku z dutiny formy.

Smrštění výstřiku z termoplastů definujeme jako rozdíl mezi objemem dutiny formy a objemem finálního výstřiku. Samotné smrštění je způsobené kombinací teplotního smrštění, objemové relaxace a orientace makromolekul termoplastů. U semikrystalických materiálů smrštění navíc ovlivňuje krystalizace.

Smrštění rozdělujeme na tzv. výrobní a povýrobní (dodatečné) smrštění. Za výrobní smrštění se považuje smrštění naměřené v časovém úseku 24 hodin po vyjmutí výstřiku při standartních normovaných podmínkách (teplota 23 °C, relativní vlhkost vzduchu 50 %). Povýrobní smrštění měříme po delším než 24 hodinovém časovém úseku a nazýváme jej také dosmrštění. Hodnota smrštění se udává v % a je popsáno rovnicí

$$S = \frac{X - X_y}{X} 100, \quad (5)$$

kde S je smrštění [%], X je rozměr formy [m] a X_y je změřený rozměr v daném místě vzorku [m].

Na velikost smrštění má vliv materiál, umístění vtoku na výstřiku, tloušťka a technologické parametry. Změny rozměrů plastových dílů jsou závislé na teplotě a tlaku, působících na výstřik během teplotně-tlakového procesu. Jednotlivé vlivy nelze posuzovat odděleně. Obecně platí, že čím je teplota vyšší, tím je smrštění větší. U tlaku můžeme pozorovat opačný děj. [13], [14], [39]

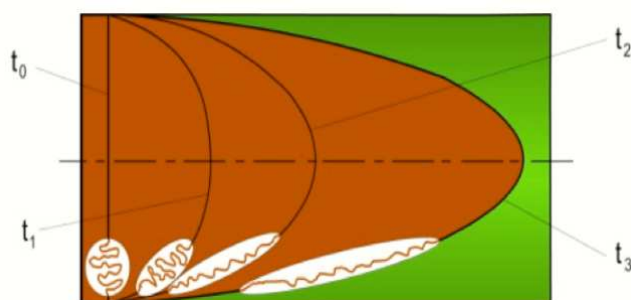
4.1. VLIV MATERIÁLU NA SMRŠTĚNÍ VÝSTŘIKŮ

4.1.1. TOK POLYMERNÍCH TAVENIN

Nauka o tečení a deformování hmoty se nazývá reologie. Je odvozena od klasické mechaniky, která se ale zabývá jen pohybem, a to hmotného bodu, soustavy hmotných bodů a tuhých těles bez rozdílu materiálu. Reologie se zabývá relativním pohybem částic tělesa navzájem, tj. deformací, která je výrazně závislá na druhu materiálu. Tedy popisuje změnu

polohy dvou bodů téhož tělesa v čase a v závislosti na silách, které na těleso působí. Předpokládá se vždy spojitě vyplnění tělesa tuhous hmotou. Reologie řeší vztah mezi napětím, deformací a časem, a to s cílem porozumět chování polymerního materiálu v průběhu jeho zpracování. Reologie používá k popisu těchto vlastností reologické modely. [23], [27]

Taveniny plastů řadíme mezi nenewtonské materiály. Při zvyšování smykového napětí či smykové rychlosti klesá dynamická viskozita tavenin termoplastů. Tento charakter tokového chování souvisí s tvarem makromolekul polymerních materiálů. Změna teploty ovlivňuje viskozitu většiny běžných tavenin. Naopak s měnící se smykovou rychlostí zůstává viskozita konstantní v důsledku přemísťování klubek jako celku. Při dalším zvyšování smykové rychlosti dochází k rozvinování klubíček ve směru toku taveniny, zobrazeno na obr. 13. [23]



Obr. 13 Rozvinování globul ve směru toku [24]

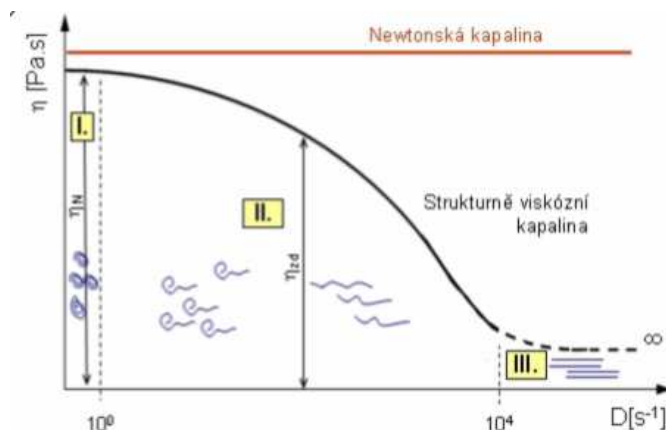
Pro popis chování tavenin polymerů je nutné znát důležitou charakteristiku toku tj. viskozitu, která určuje míru odporu kapaliny proti tečení a tok je popsán pomocí Newtonova zákona

$$\tau = \eta * \frac{dv}{dx} = \eta * D, \quad (6)$$

kde τ je smykové napětí [Pa], η je dynamická viskozita [Pa s] a $\frac{dv}{dx}$, D je smyková rychlost [s^{-1}]. Newtonův zákon platí pouze pro laminární tok nízkomolekulárních kapalin za izotermických podmínek.

Na obr. 14 je znázorněná závislost dynamické viskozity tavenin polymerů na smykové rychlosti, kdy v první oblasti, neboli v oblasti maximální newtonské viskozity, se nachází materiál při nízkých smykových rychlostech. To je do oblasti 10^{-1} až $10^0 s^{-1}$. Taveniny polymerů mají amorfni strukturu a molekuly zaujímají tvar tzv. klubek. Této

oblasti přísluší maximální entropie systému. V druhé oblasti, při vyšších smykových rychlostech, dochází k poklesu viskozity v důsledku rozbalování klubíček makromolekul ve směru toku. Tyto částečně rozbalená klubíčka se pohybují snadněji, a proto klesá viskozita taveniny. V poslední oblasti při extrémně vysokých smykových rychlostech dochází k úplnému rozbalení klubíček a viskozita není závislá na smykové rychlosti. Tohoto stádia však nejsme schopni v praxi dosáhnout. [23], [26]



Obr. 14 Závislost dynamické viskozity tavenin polymerů na smykové rychlosti [25]

Tokové křivky mohou být popsány různými rovnicemi o dvou, třech a více parametrech. Velikost viskozity při zpracovatelských procesech polymerů můžeme popsat pomocí mocninového zákona tzv. Ostwald de Waele, který se týká pouze oblasti zdánlivé viskozity a je nejvíce používán v praxi.

$$D = \varphi * \tau^m, \quad (7)$$

Kde D je smyková rychlost [s^{-1}], φ je koeficient tekutosti [$Pa^{-1} s^{-1}$], τ je smykové napětí [Pa] a m index tokového chování [-].

Pro popis reologického chování se dají používat i reologické modely, které umožňují popsat tok jak v tekutém, tak i tuhém stavu. Deformace při vnějším namáhání polymerů zahrnuje jak složku elastickou, tak i plastickou a ještě zpožděně elastickou. Takové chování se nazývá viskoelastické. Pokud vezmeme v úvahu proces vstřikování, tak na vstřikovaný plast působí velká smyková a normálová napětí.

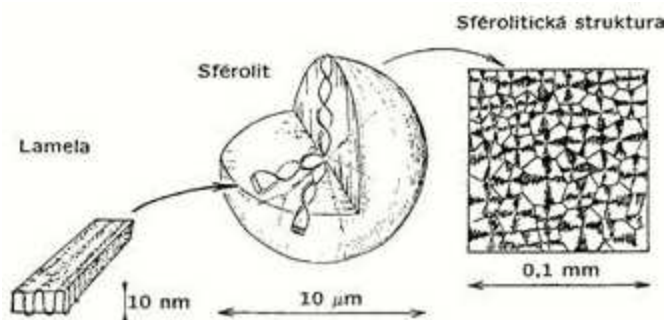
4.1.2. MORFOLOGIE POLYMERŮ

Morfologie neboli nadmolekulární struktura polymerů má vliv na vlastnosti materiálů, mezi které patří i smrštění. Již zmíněná nadmolekulární struktura se vytváří při

procesu ochlazování roztaveného materiálu, např. v dutině formy. Základním morfologickým útvarem amorfních molekul jsou globuly neboli tzv. klubíčka, které tvoří chaoticky zamotané makromolekuly. Každá globula si zachovává individuální charakter. Při působení vnějších sil se řetězce rozmotávají a tvoří rozvinuté svazky. Amorfní strukturou rozumíme strukturu bez jakékoliv uspořádanosti. Druhou strukturou polymerů je semikrystalická. Ta se vyznačuje určitým stupněm uspořádanosti. Jejím základním útvarem jsou lamely a fibrily. Kromě tokového chování tavenin ovlivňují velikost smrštění i samotné vlastnosti plastů jako je jejich vnitřní struktura, orientace makromolekul a vláken, tepelné vlastnosti a u semikrystalických látek také jejich krystalizace.[23], [26], [28], [29], [30]

Hlavní prvky nadmolekulární struktury se vytváří při tuhnutí taveniny materiálů. U semikrystalických polymerů dochází k primární krystalizaci, kdy materiál přechází z tekutého do tuhého stavu. Samotná krystalizace pokračuje i v tuhém stavu a to dle podmínek i několik měsíců. Následnou krystalizaci nazýváme sekundární. Sekundární krystalizace způsobuje nekontrolované změny struktury a vlastností konečných výrobků. Podmínky tuhnutí taveniny nejsou ve všech částech výrobků stejné a krystalizace je nerovnoměrná. Vzniká nestejnorodý materiál, neboť tavenina nejdříve chladne u stěny a nejteplejší zůstává uprostřed výrobku. Z tohoto důvodu je nejvyšší stupeň krystalinity v jádru. Orientace makromolekul je na povrchu výrobku ve směru toku taveniny a uvnitř spíše neuspořádána. V důsledku uspořádanosti struktury může být smrštění semikrystalických polymerů několikrát větší než smrštění u amorfních plastů. [28], [29]

Chemická stavba řetězce makromolekul ovlivňuje vznik krystalizace. Z tohoto důvodu dochází ke krystalizaci jen u semikrystalických materiálů. Řetězce se skládají do tzv. lamel, které jsou základním krystalickým útvarem, to je zobrazeno na obr. 15. Z nich se dále vytváří složitější útvary tzv. sférolity. Jelikož se jedná o semikrystalické materiály, tak oblasti mezi krystalickými útvary vyplňují oblasti amorfní.



Obr. 15 Struktura semikrystalických polymerů [56]

U semikrystalických materiálů ovlivňuje smrštění vznik krystalické struktury při ochlazování taveniny materiálu v dutině formy objemové smrštění výstřiku. Výsledná struktura a vlastnosti jsou u těchto materiálů závislé na podmínkách krystalizace. Mezi hlavní patří čas, teplota a oblast vzniku krystalické struktury. Na vývoj struktury výstřiku má také vliv rychlost ochlazování, která ovlivňuje nukleaci, vznik krystalů a jejich růst. Při pomalém ochlazování dochází k vytvoření vyššího stupně krystalizace a tím pádem i k velkému smrštění. Naopak rychlý pokles teploty taveniny vyvolává zpomalení nukleačních procesů, vzniká struktura obsahující nižší stupeň krystalizace a výstřik vykazuje menší smrštění. Následně může proběhnout dokrystalizace a dodatečné smrštění. [13], [28], [29]

Pro samotnou krystalizaci jsou důležité dvě teploty, a to teplota skelného přechodu T_g a teplota tání krystalického podílu T_m . Pod teplotou T_g se materiály chovají jako organické sklo. Nad teplotou T_m dochází k tání krystalické struktury, materiál přechází zpět do taveniny s neuspořádanou strukturou a chování se přibližuje chování amorfních polymerů. Z tohoto vyplývá, že maximální stupeň krystalinity je mezi těmito teplotami. [13], [28], [29]

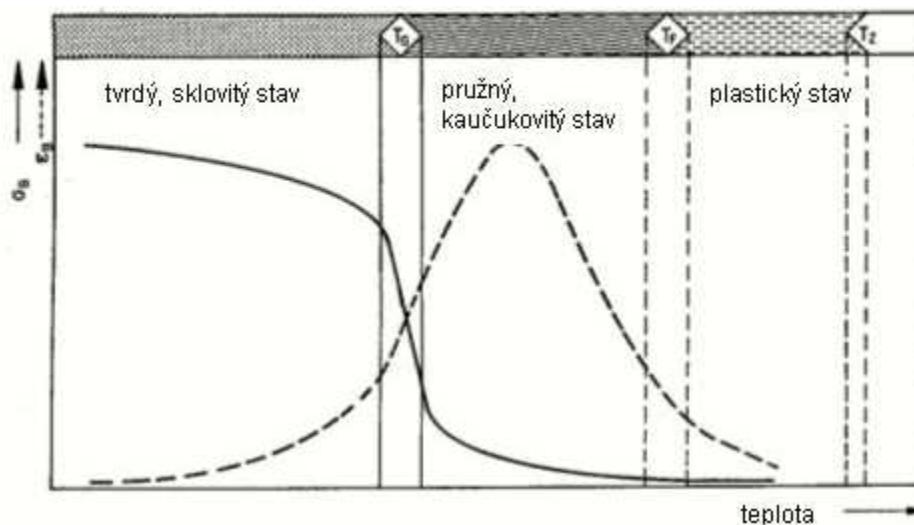
4.1.3. TERMODYNAMICKÉ VLASTNOSTI PLASTŮ

V jednotlivých oblastech teplot se vlastnosti mění pomalu či skokově. Tyto oblasti nazýváme přechodové a teploty s nimi spjaté jako přechodové teploty. Ty rozlišujeme jak pro amorfní, tak i pro semikrystalický materiál. Mezi významné teploty patří T_g - teplota zesklenní nebo teplota skelného přechodu, T_f - teplota viskózního toku (pro amorfní plasty) a T_m - teplota tání (pro semikrystalické plasty).

Pro amorfní polymery se hodnota meze pevnosti v tahu (a také modulu pružnosti) v přechodové oblasti v okolí teploty zesklenní T_g mění skokově. Konkrétní hodnota této teploty závisí na ohebnosti řetězce, na velikosti makromolekulárních sil a na symetričnosti částí makromolekul. Čím vyšší budou makromolekulární síly, tím bude vyšší i teplota a čím bude vyšší ohebnost řetězců, tím bude nižší teplota zesklenní. Teplotu zesklenní je možno ovlivnit např. přidávkem změkčovadel, které sníží mezimolekulární soudržnost a tím i T_g .

U amorfních polymerů nacházíme ještě jednu teplotu viskózního toku T_f , kdy intenzita změn vlastností polymeru narůstá. Při této teplotě se kaučukovitě pružná hmota mění ve vysoce viskózní kapalinu. Nad touto teplotou leží oblast zpracovatelnosti amorfních materiálů. V oblasti pod teplotou skelného přechodu je výrazně vyšší smrštění než v oblasti

mezi teplotami skelného přechodu a viskózního toku. Toto chování je popsáno na obr. 16. [13], [28], [29], [30], [31]



Obr. 16 Průběh deformačních vlastností u amorfního plastu [30]

Obdobně ovlivňují přechodové teploty i smrštění u semikrystalických materiálů. U semikrystalických polymerů dochází k nejrychlejším změnám vlastností v oblasti teplot, kterou charakterizuje teplota tání T_m . Při teplotě tání dochází díky vibračním k rozpadu a tání krystalitů, což je provázeno změnou fáze hmoty a proběhne tání krystalitů. Tím hmota přechází do kapalného stavu. Toto tání se děje v určitém teplotním rozsahu a teplota T_m představuje pouze střední hodnotu této oblasti. Konkrétní hodnota teploty tání závisí na velikosti mezimolekulárních sil a na velikosti makromolekul. Zvětšení obou veličin má za následek zvýšení teploty tání. Protože se semikrystalické polymery skládají i z amorfni části, stanovujeme u nich také i teplotu skelného přechodu T_g . Změny ovlivňující touto teplotou se týkají pouze amorfni části polymeru. Při vyšším stupni krystalinity, jsou tyto změny méně patrné.

4.1.4. ORIENTACE MAKROMOLEKUL

Na makromolekuly polymerů působí smykové síly při toku taveniny. V roztaveném stavu zaujímají makromolekuly polymeru polohu, která je pro ně energeticky nejvýhodnější. Proto mají makromolekuly tendenci zabalovat se do klubíček. Ty se účinkem smykových sil rozbalují a makromolekuly se uspořádají ve směru toku taveniny. Toto nazýváme orientace makromolekul ve směru toku.

Pokud nastane rychlé ochlazení této struktury, dojde k zabránění navrácení do původního stavu. Tím se makromolekuly nacházejí v energeticky nevýhodném, nerovnovážném stavu. A proto mají snahu vrátit se do původní polohy, klubiček. K tomuto musí být dostatečně pohyblivé a mít dostatečný čas k relaxaci. Samotnou pohyblivost makromolekul ovlivňuje teplota taveniny. Procesem relaxace nazýváme proces snižování orientace. Tento proces také nazýváme dezorientace. Ta nastává ve formě při ochlazování taveniny. V důsledku tohoto se na výrobku nachází části, kde dezorientace proběhne či nikoliv a následně dochází k anizotropii smrštění výrobku. [13], [28], [29], [30], [31]

U neplněných plastů je smrštění ve směru toku taveniny větší než ve směru kolmém. Tento rozdíl závisí na nadmolekulární struktuře. U semikrystalických polymerů můžeme pozorovat rozdíl mezi příčným a podélným smrštěním až o 30 %, u amorfních jen o 10 %. [32]

Ve všech místech výstřiku nejsou stejné podmínky pro vznik orientované struktury. Orientace se mění jak ve směru tloušťky stěny, tak i ve vzdálenosti od vtoku. Díky chlazení na stěně dutiny dochází k vytvoření neorientované vrstvy. V ostatních místech orientace závisí od působení smykového napětí, které jsou největší ve vrstvě navazující na vrstvu ztuhlou u stěny dutiny. U osy výrobku se smykové napětí pohybuje v oblasti okolo nuly. Stejný průběh vykazuje i orientace makromolekul, která je také největší u povrchu a u osy výrobku se blíží k nule. Dále tyto orientace ovlivňuje vzdálenost od vtoku, neboť u vtoku se nachází největší tlak, který klesá, až je na čele roven tlaku atmosférickému. Se zvětšující vzdáleností od vtoku se orientace snižuje v důsledku měnící se hodnoty smykového napětí, která je úměrná tlaku. [28], [29], [30], [31]

4.2. VLV PROCESNÍCH PARAMETRŮ VSTŘIKOVÁNÍ NA SMRŠTĚNÍ

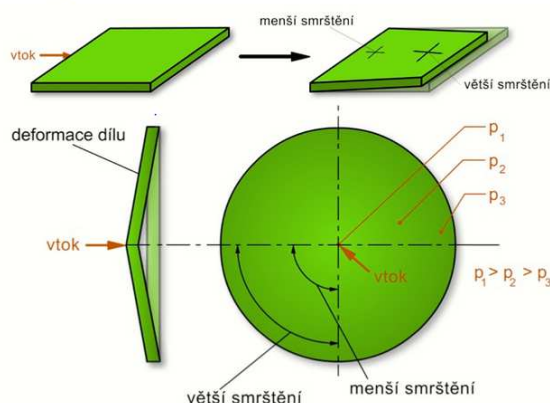
Při procesu vstřikování dílů z plastů ovlivňují všechny parametry, které vstupují do procesu, jak finální vlastnosti výstřiku, tak i velikost smrštění. Jednotlivé faktory ovlivňující smrštění se ovlivňují navzájem, jsou na sobě závislé a vazba mezi nimi je komplexní. Jelikož působení jednotlivých faktorů je obtížné rozlišit, hodnotí se vliv základních faktorů samostatně. Mezi tyto základní faktory řadíme parametry, které ovlivňují časový průběh teploty a tlaku taveniny v dutině formy: teplota formy T_f , teplota taveniny při výstupu z trysky T_t , doba plnění formy t_v , doba dotlaku t_d , doba chlazení t_{ch} , vstřikovací tlak p_v a dotlak p_d . Dále rozlišujeme parametry vedlejší, které slouží k ovládání základních parametrů, mezi které řadíme teplotu temperačního média obou částí formy T_{m1} , T_{m2} , teploty

jednotlivých pásem komory T_k a trysky T_{tr} , otáčky šneku n_s , doba plastikace t_{pl} , doba manipulace t_m , zpětný tlak p_{zp} . [36], [38]

4.2.1. VLIV VSTŘIKOVACÍHO TLAKU

Jelikož je velikost vstřikovacího tlaku rozhodující pro kvalitu výstřiku, je nutné, aby byl dostatečně velký. Vyšší hodnoty vstřikovacího tlaku snižují smrštění. Pro jednotlivé fáze vstřikování je průběh vstřikovacího tlaku řízen v závislosti na dráze šneku, čase a tlaku v dutině formy. Jeho maximální hodnotu limituje uzavírací síla stroje, aby nedocházelo k otevření formy.

V rozdílných místech v dutině formy lze pozorovat odlišný průběh tlaku. Nejvyšší je u vtokového ústí, naopak na konci plnění je tlak nejnižší. Tyto rozdílné hodnoty vstřikovacího tlaku mají významný vliv i na smrštění v různých místech dutiny formy. A s tím souvisí anizotropie smrštění zobrazená na obr. 17. Ke zmenšení smrštění přispívají vyšší vstřikovací tlaky. Optimální vstřikovací tlak závisí na viskozitě taveniny a na délce toku taveniny v dutině formy, na tloušťce stěny a designu výstřiku. [36], [38]

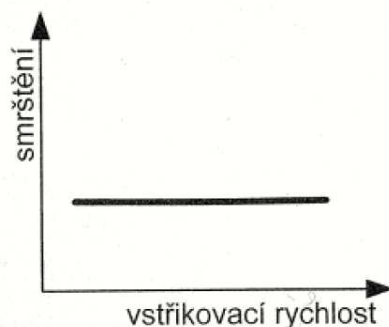


Obr. 17 Anizotropie smrštění [32]

4.2.2. VLIV VSTŘIKOVACÍ RYCHLOSTI

Vliv vstřikovací rychlosti na smrštění je nejednoznačný a je zobrazen na obr. 18. Díky tření materiálu dochází k zvyšování teploty taveniny a tím i ke zvýšení tlaku v dutině formy. Zároveň dochází k orientaci makromolekul ve směru vtoku, kterou příznivě ovlivňuje vysoká vstřikovací rychlost. Je důležité dosáhnout optimální vstřikovací rychlosti, neboť při pomalém plnění dochází k dřívějšímu tuhnutí taveniny a dochází k zvyšování tlaku. Dále dochází k zamrznutí vtoku před úplným zaplněním dutiny formy, což má za následek zvýšení smrštění výstřiku. Naopak je-li dutina formy naplněna příliš rychle, dochází

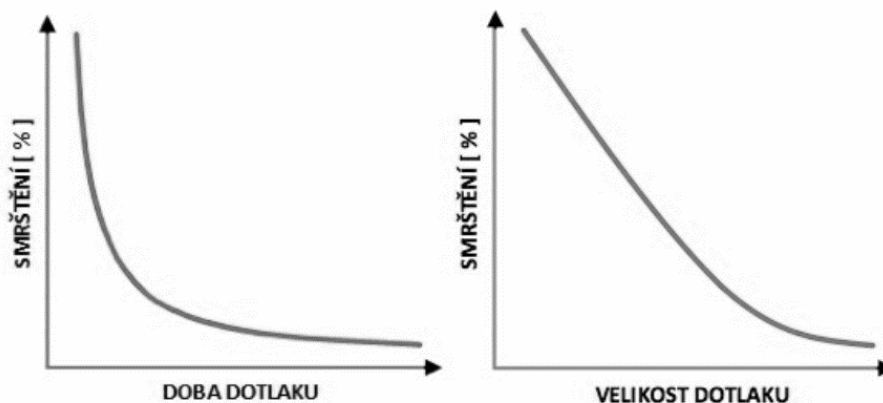
k velkému poklesu tlaku a je nutné zvyšovat hodnoty vstřikovacího tlaku. V důsledku tohoto dochází ke zvyšování teploty taveniny a tím i k zvětšení smrštění. Optimální vstřikovací rychlost tedy můžeme ovlivnit teplotou taveniny a formy, geometrií dílu a velikostí a umístěním vtoku. [36], [38]



Obr. 18 Vliv vstřikovací rychlosti na smrštění [36]

4.2.3. VLIV DOTLAKU

Mezi parametry, které mají rozhodující vliv na smrštění, řadíme dotlak. Vliv dotlaku (velikosti, doba) na smrštění je zobrazen na obr. 19.



Obr. 19 Vliv dotlaku na smrštění [39]

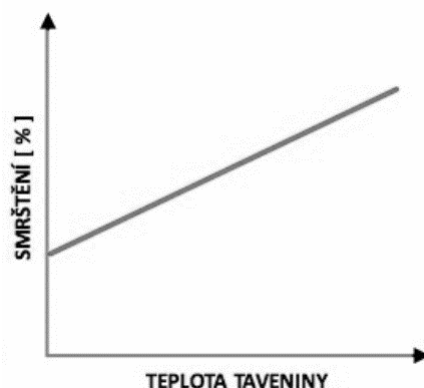
Velikost smrštění ovlivňuje nejen doba dotlaku, ale také i velikost dotlaku. Platí, že čím je delší doba dotlaku, tím je menší smrštění. Pokud by docházelo k prodlužování doby dotlaku i ve fázi, kdy došlo již k zamrznutí vtokového ústí, nemělo by to již žádný vliv na smrštění. Stejně jako doba dotlaku, tak i velikost dotlaku má rozhodující vliv na smrštění. Příliš vysoký dotlak může ovlivnit hodnotu zbytkového tlaku a následně může docházet

k problémům s vyjímáním dílů. Naopak nízký dotlak může způsobit kvalitativní vady u tlustostěnných výstřiků, a to ve formě propadlin, vnitřních staženin či pórovitosti.

K určení vhodné doby dotlaku se používá metoda sledování hmotnosti výstřiku, nebo se vyhodnocuje průběh tlaků pomocí tlakových čidel umístěných v dutině formy. [36], [39]

4.2.4. VLIV TEPLoty TAVENINY

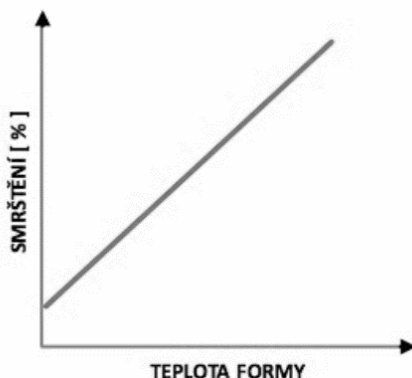
Následkem zvýšení teploty taveniny dochází ke zvýšení tepelné kontrakce a tím ke zvětšení hodnoty smrštění. Zároveň snižuje viskozitu, čímž je způsobena vyšší tlaková odezva, a to vede ke snížení smrštění. Teplota taveniny ovlivňuje tedy smrštění dvěma protichůdnými jevy. Ale jelikož je působení dotlaku výraznější než působení teploty taveniny, tak je důležitější efekt, že se zvyšující teplotou taveniny vzrůstá smrštění, zobrazeno na obr. 20. [36], [39]



Obr. 20 Vliv teploty taveniny na smrštění [39]

4.2.5. VLIV TEPLoty FORMY

Teplota formy ovlivňuje nejen rychlost chladnutí, ale také rychlost plnění dutiny formy, rychlost ochlazování výstřiku a tím i dobu chlazení. Z ekonomického hlediska se volí co nejkratší čas chlazení, aby došlo ke zkrácení vstřikovacího cyklu. Naopak z hlediska technologického by bylo nejvhodnější prodloužit dobu chlazení na maximum. Samotné uspořádání makromolekul ovlivňuje čas chlazení. Při rychlém ochlazení je kratší čas pro nejvýhodnější vnitřní uspořádání makromolekul a získání co nejnižšího smrštění. Nízká teplota způsobuje vysoký gradient chlazení a dochází k malému smrštění, to je zobrazeno na obr. 21. Důsledkem toho ale dochází k vysokým hodnotám dosmrštění, obzvláště u semikrystalických materiálů. [36], [38]



Obr. 21 Vliv teploty formy na smrštění [39]

4.3. Vliv konstrukce výstříku a formy na smrštění

Nejen vstřikovací parametry ale i samotný design výstříku má vliv na výsledné smrštění výstříku. Z konstrukčního hlediska je důležité zohlednit druh vybraného materiálu a jeho chování. Dále musí výstřík splňovat požadované nároky na mechanické, pevnostní a kvalitativní požadavky. Při navrhování tvaru výstříku je nutné dodržovat zásady jako je rovnoměrná tloušťka stěny, zaoblení stěny, velikost úkosů, umístění vtoku či vtoků a maximální délka toku taveniny.

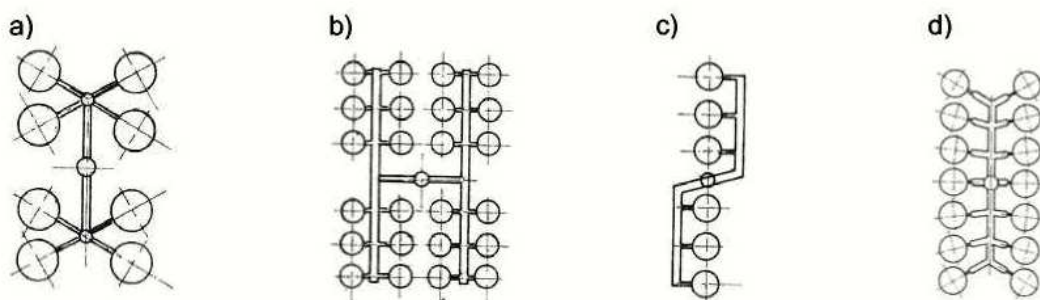
Důležitým faktorem ovlivňujícím smrštění je samotný tvar výstříku. Pro rovnoměrné smrštění a minimální vnitřní pnutí je důležitá podmínka rovnoměrnosti tloušťky stěn výstříku. Tloušťka stěny by měla odpovídat požadavkům pevnostním a mechanickým, ale zároveň by měla být co nejtenčí, aby nedocházelo k zbytečnému prodlužování času cyklu. Tloušťka žeber by měla být menší, než je tloušťka stěny, ke které jsou připojeny. Čím větší je tloušťka stěny, tím delší je čas chlazení a následně dochází k většímu smrštění. Překážky pro tok taveniny představují také rohy a žebra, kde dochází k víření taveniny a změně orientace makromolekul. Následkem tohoto se v těchto místech liší i smrštění v důsledku jiné orientace makromolekul. Velikost smrštění v této oblasti může ovlivnit návrh s minimalizací ostrých přechodů zaměněním za radius. Na obr. 22 jsou znázorněny způsoby korekce propadlin u žeber na výstříku. [26], [36], [38], [40]



Obr. 22 Způsoby korekce propadlin u žeber [41]

Smrštění materiálu ovlivňuje také použití jader, kovových či jiných zálisků. V důsledku jejich použití dochází ve výstřiku ke vzniku tahových pnutí. Velikost těchto pnutí snižujeme předehřevem kovových zálisků před umístěním do dutiny formy. Díky vzniklým pnutím v oblasti zálisků dochází k většímu dodatečnému smrštění. [26], [36]

Dle násobnosti formy, počtu tvarových dutin se určuje vtoková soustava a její uspořádání. Příklad uspořádání vtokových soustav je zobrazen na obr. 23. [36], [38]



Obr. 23 Uspořádání vtokových soustav u vícenásobných forem a) se stejnou délkou toku taveniny b), c), d) s nestejnou délkou toku taveniny [40]

Vybraný druh a umístění vtoku má podstatný vliv zejména u termoplastů, kdy může v důsledku proudění taveniny docházet ke vzniku tzv. studených spojů. Vtok by měl být umístěn v místě nejtlustší stěny a tavenina by měla téct směrem k nejtenčímu místu výstřiku. Při použití více vtoků je nutno je umístit tak, aby docházelo k lineárnímu toku jednotlivých proudů. U vícenásobných forem je důležité, aby byly všechny tvarové dutiny plněny současně a při stejných podmínkách. A to při stejné teplotě taveniny a při stejném vnitřním tlaku. To má vliv na orientaci makromolekul a v důsledku toho na smrštění.

Plnění dutiny formy také ovlivňuje velikost průřezu a délka rozváděcích kanálů. Čím jsou větší délky rozváděcích kanálů, tím je větší smrštění v důsledku zvyšujícího se odporu proti tečení.

5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Cílem disertační práce bylo získat poznatky o vlivu technologických parametrů vstřikovacího procesu na změny rozměrů finálního výrobku připraveného z biodegradovatelných materiálů. Na základě zjištěných výsledků mělo buď dojít k potvrzení současných známých teoretických poznatků (přínosy pro vědu) anebo nalézt optimální kombinaci technologických parametrů (přínosy pro praxi) pro vybrané materiály s cílem ovlivnit a řídit velikost výrobního smrštění.

Pro výzkum smrštění byly vybrány biodegradibilní materiály a to biopolymer PLA 3251D od firmy NatureWorks, Injection Molding Process Guide popsany v příloze P1 [20] a materiál Synterra® PLLA 1010, Version: 2011-12 popsany v příloze P2 [22], jejichž granuláty jsou zobrazeny na obr. 1.

Hlavní část výzkumných činností se věnuje měření výrobního smrštění na připravených zkušebních tělesech o různé tloušťce vyrobených při rozdílných technologických podmínkách. Další část výzkumných činností tvoří simulace procesu. Jelikož samotný proces ovlivňuje mnoho materiálových, technologických a konstrukčních faktorů, zabývaly se výzkumné činnosti následujícími oblastmi:

- Výběr technologických parametrů pro přípravu zkušebních těles.
- Aplikace pokročilé statistické metody pro stanovení limitních hodnot technologických parametrů
- Výzkum dopadů technologických parametrů na výrobní smrštění
- Hodnocení průběhu tlaku ve tvarové dutině na vzdálenosti tečení
- Simulační analýza procesu vstřikování a jejich verifikace

5.1. TECHNOLOGIE ZPRACOVÁNÍ MATERIÁLŮ PLA A PLLA

Dle materiálových listů v Příloze P1 a P2 byly pro výrobu a přípravu zkušebních těles použity doporučené parametry pro vybrané materiály výrobcem. A doplněny o další potřebné parametry pro nastavení stroje, které nejsou v materiálovém listě uvedeny. Parametry a jejich velikost jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 1 Vstřikovací tlak

Materiál	Tloušťka stěny [mm]	Nastavený max. vstřikovací tlak [MPa]
PLA	2	200
PLA	4	200
PLLA	2	200
PLLA	4	200

Tab. 2 Čas vstřiku

Materiál	Tloušťka stěny [mm]	Vstřikovací rychlost [cm³/s]		
PLA	2	25	50	75
PLA	4	25	50	75
PLLA	2	25	50	75
PLLA	4	25	50	75

Tab. 3 Dotlak

Materiál	Tloušťka stěny [mm]	Dotlak [%]		
PLA	2	80	90	100
PLA	4	80	90	100
PLLA	2	80	90	100
PLLA	4	80	90	100

Tab. 4 Čas dotlaku

Materiál	Tloušťka stěny [mm]	Čas dotlaku [s]
PLA	2	4
PLA	4	5
PLLA	2	4
PLLA	4	7

Tab. 5 Teplota formy

Materiál	Tloušťka stěny [mm]	Teplota vody [°C]
PLA	2	25
PLA	4	
PLLA	2	
PLLA	4	

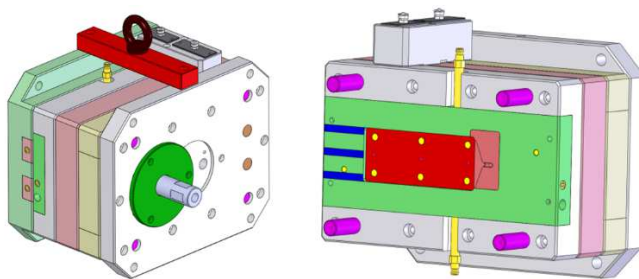
Tab. 6 Teplota taveniny

Materiál	Tloušťka stěny [mm]	Teplota taveniny [°C]		
PLA	2	175	185	205
PLA	4	175	185	205
PLLA	2	185	195	205
PLLA	4	185	195	205

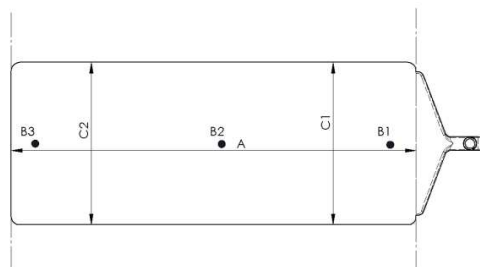
5.2. VSTŘIKOVACÍ FORMA

Pro výzkum lokálního výrobního smrštění materiálů PLA a PLLA byla použita vstřikovací forma dle užitého vzoru č. 22895 zobrazená na obr. 24. Forma je rozdělena v

dělicí rovině na pevnou a pohyblivou část. V pevné části formy je deska a je zde umístěna část filmového vtokového systému s výměnnou vložkou. Pohyblivá část se skládá ze systému vyhazovačů, matrice a vložky vytvářející vlastní dutinu. To je geometrický prostor definující rozměry výstřiku a umožňující modifikaci tloušťky zkušební tělesa. V dolní části je provedeno odvodušnění, aby nedocházelo k uzavírání vzduchu při plnění dutiny. Dále jsou v této dutině umístěny teplotně tlaková čidla firmy Kistler ve třech místech formy, a to přímo do její dutiny, zobrazeno na obr. 25.

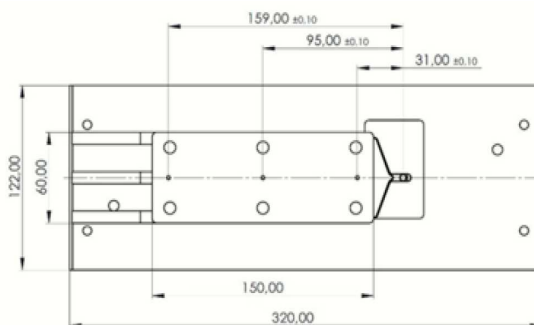


Obr. 24 3D model vstřikovací formy



Obr. 25 Rozmístění čidel B1, B2, B3

Aby bylo možné měřit a hodnotit smrštění, je nutné znát přesné rozměry tvarové dutiny vstřikovací formy. Z tohoto důvodu byly rozměry tvarové dutiny měřeny na klimatizovaném měrovém místě při teplotě 22 °C. Měření bylo provedeno dle metodiky ČSN EN ISO 294-4. Naměřené hodnoty pro tloušťky dutiny 2 a 4 mm jsou uvedeny v tab. 7, výkres tvarové dutiny s předepsanými tolerancemi je zobrazen na obr. 26.



Obr. 26 Rozměry tvarové dutiny

Tab. 7 Rozměry dutiny formy

Tloušťka stěny [mm]	Označení rozměru [-]	Velikost [mm]
2	a	149,99
	b	60,03
	c	2,02
4	a	149,99
	b	60,03
	c	4,06

5.3. VSTŘIKOVACÍ STROJ

Vstřikovací forma byla umístěna na stroji Arburg 470C-1500-400, který je zobrazen na obr. 27, kde probíhalo vstřikování zkušebních těles ze zkoumaných materiálů PLA a PLLA. Jeho hlavními parametry jsou uzavírací síla 1500 kN, hmotnost výstřiku přepočtená pro polystyren 141 g a průměr šneku 35 mm.



Obr. 27 Vstřikovací stroj [46]

5.4. MĚŘICÍ SYSTÉM KISTLER

Pro měření teplot a tlaků ve formě byl použit měřicí systém Kistler, který je zobrazen na obr. 28. Ve formě byly umístěny snímače pro snímání teploty a tlaku s průměrem 2,5 mm. Pro vyhodnocení dat byl použit software CoMo DataCenter. Měřená data byla ukládána do databáze. Pomocí vhodného rozhraní bylo možné data převést a analyzovat. Software CoMo DataCenter může být také lokálně napojen na počítač pro uložení dat. Uložená data z databáze byla následně exportována a byly z nich připraveny grafy pro další analýzu procesu.



Obr. 28 Měřicí systém Como Injection - Kistler [47]

5.5. TAGUCHIHO METODA

Pro výzkum výrobního smrštění pro uvažované technologické parametry by bylo potřeba vyrobit velké množství zkušebních těles v závislosti na možných kombinacích parametrů a jejich úrovní. Proto byly definovány vstřikovací parametry, které byly z hlediska úrovní omezeny limitními hodnotami parametrů daných výrobcem. Zároveň byl experiment sestaven tak, aby byl výběr technologických parametrů a počet jejich kombinací omezen dle Taguchiho statistické metody [48], [49], [50]. Pomocí této metody byly určeny varianty a kombinace vstřikovacích parametrů – teploty taveniny, vstřikovací rychlosti a velikost dotlaku. Pro experimentální měření byla vybrána teplota taveniny 175, 185, 195 °C pro materiál PLA, a teplota 185, 195, 205 °C pro materiál PLLA a to z důvodu potřebné homogenity taveniny. Vstřikovací rychlost byla pro oba materiály vybrána 25, 50 a 75 cm³/s. Dotlak byl vypočítán z hodnoty vstřikovacího tlaku při přepnutí na dotlak a byly použity hodnoty 80, 90 a 100 % vstřikovacího tlaku. Jednotlivé zvolené technologické parametry a jejich úrovně jsou popsány v tab. 8, kde každý parametr má definován tzv. stupeň experimentu ve třech stupních. Pro parametr tloušťky byly zadány stupně dva.

Tab. 8 Stupně experimentu pro materiál PLA a PLLA

Faktor experimentu	Stupeň experimentu					
	PLA			PLLA		
	1	2	3	1	2	3
A: Teplota taveniny [°C]	175	185	195	185	195	205
B: Dotlak [%]	80	90	100	80	90	100
C: Vstřikovací rychlost [cm³/s]	25	50	75	25	50	75
D: Tloušťka výstřiku [mm]	2	4	-	2	4	-

Postup procesu vstřikování byl takový, že v prvním kroku byla forma naplněna pomocí plnicí studie až k 93 % naplnění. Poté byl vstřikovací tlak přepnut na dotlak a jeho čas byl určen pomocí hmotnostní studie. Čas potřebný k naplnění formy byl postupně zvyšován až na konstantní hmotnost výstřiku. Čas chlazení byl určen pomocí teplotního pole

na analyzovaném vzorku a také s ohledem na jeho vyjímání. Tímto postupem byly připraveny destičky o dvou tloušťkách, které byly definovány vnitřními rozměry.

Tab. 9 Parametry experimentu pro materiál PLA a PLLA

	Čís. m.	PLA				PLLA			
		A	B	C	D	A	B	C	D
2 mm	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	2	2	1	1	2	2	1
	3	1	3	3	1	1	3	3	1
	4	2	1	2	1	2	1	2	1
	5	2	2	3	1	2	2	3	1
	6	2	3	1	1	2	3	1	1
	7	3	1	3	1	3	1	3	1
	8	3	2	1	1	3	2	1	1
	9	3	3	2	1	3	3	2	1
4mm	10	1	1	1	2	1	1	1	2
	11	1	2	2	2	1	2	2	2
	12	1	3	3	2	1	3	3	2
	13	2	1	2	2	2	1	2	2
	14	2	2	3	2	2	2	3	2
	15	2	3	1	2	2	3	1	2
	16	3	1	3	2	3	1	3	2
	17	3	2	1	2	3	2	1	2
	18	3	3	2	2	3	3	2	2

Jak již bylo zmíněno v úvodu kapitoly, byla použita Taguchiho statistická metoda, pomocí které byl proveden systematický a efektivní postup pro optimalizaci parametrů vstřikovacího procesu, což bylo jedním z cílů disertační práce. Pomocí metody byly vybrány kombinace parametrů vstřikování tj. 3 technologických parametrů + 1 parametr tloušťky ovlivňujících vstřikovací proces. Parametry experimentu jsou popsány v tab. 9. V této tabulce jsou zapsány ortogonální řady Taguchiho metody, které byly použity pro samotnou přípravu zkušebních těles. [50]

Na základě Taguchiho statistické metody byly připraveny varianty a kombinace technologických parametrů pro výrobu zkušebních těles (obr. 29) a měření výrobního smrštění.

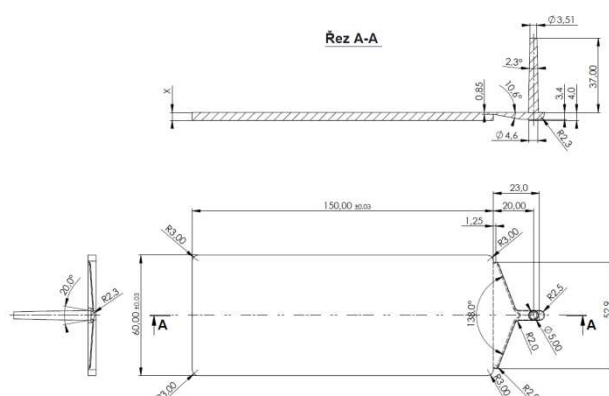
5.6. VÝZKUM VLIVU TECHNOLOGICKÝCH PARAMETRŮ NA SMRŠTĚNÍ

Velikost smrštění byla počítána dle evropské normy EN ISO 294-4:2003, kde 4. část normy určuje stanovení výrobního smrštění a následného smrštění zkušebních těles

připravených vstřikováním. A to jak ve směru kolmém na tok taveniny, tak i ve směru rovnoběžném. Při experimentu byly použity zkušební tělesa o velikosti 150 x 60 x 2 mm a 150 x 60 x 4 mm. Na vstřikovaných tělesech byla měřena délka, šířka ve dvou místech a tloušťka ve třech místech. Pro výzkum lokálního výrobního smrštění byly použity naměřené tloušťky těles. Rozměry byly měřeny po 24 hodinách, a to vždy při stejných podmínkách.



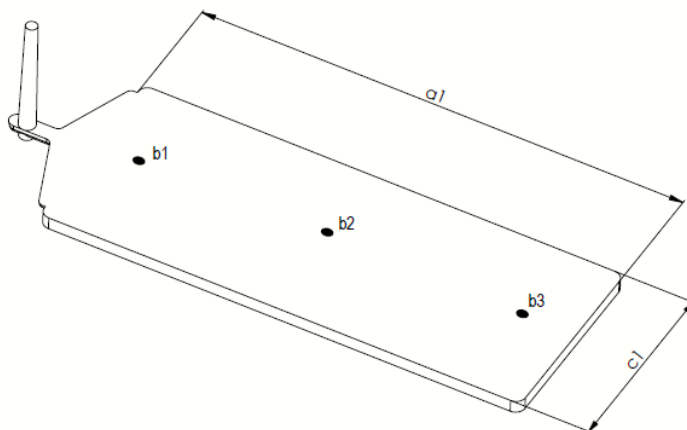
a)



b)

Obr. 29 Výstřik (a), geometrie výstřiku s vtokovou soustavou (b)

Na obr. 30 jsou uvedeny pozice, ve kterých byly změřeny tloušťky zkušebních těles pomocí mikrometru Mitutoyo (digimatic micrometer, č. 389-511-30, PMU 150-250M) a posuvného měřidla. Tato měření byla vždy pětkrát opakována. Měřené tloušťky se nacházejí v oblasti přítomnosti čidel, kde byla měřena teplota a tlak ve formě.



Obr. 30 Pozice pro měření tloušťky výstřiku

Z hodnot tloušťek vzorků byla vypočtena smrštění (tab. 10) pro obě tloušťky výstřiku a všechny varianty vstřikovacích parametrů, viz tab. 9.

Tab. 10 Průměrné hodnoty smrštění se směrodatnou odchylkou v bodech B1, B2, B3

	Čís. m.	PLA			PLLA		
		B1	B2	B3	B1	B2	B3
2 mm	1	2,54 ± 0,21	3,82 ± 0,35	4,70 ± 0,34	2,26 ± 0,40	4,44 ± 0,20	5,86 ± 0,41
	2	1,86 ± 0,17	4,03 ± 0,30	4,98 ± 0,77	0,21 ± 0,14	2,65 ± 0,15	4,09 ± 0,36
	3	0,71 ± 0,45	3,14 ± 0,58	3,84 ± 0,23	0,00 ± 0,25	2,07 ± 0,49	4,01 ± 0,30
	4	1,78 ± 0,17	4,03 ± 0,25	4,80 ± 0,30	2,37 ± 0,29	4,10 ± 0,30	5,52 ± 0,12
	5	1,54 ± 0,22	3,27 ± 0,20	4,63 ± 0,45	1,14 ± 0,41	3,00 ± 0,36	4,81 ± 0,51
	6	4,62 ± 0,25	5,77 ± 0,30	6,85 ± 0,40	1,54 ± 0,34	3,81 ± 0,25	5,48 ± 0,19
	7	2,43 ± 0,40	4,54 ± 0,39	5,40 ± 0,45	2,69 ± 0,31	4,58 ± 0,24	5,93 ± 0,23
	8	4,15 ± 0,40	5,31 ± 0,66	6,77 ± 0,30	2,21 ± 0,25	4,31 ± 0,68	6,21 ± 0,14
	9	5,27 ± 0,38	6,65 ± 0,52	7,99 ± 0,72	0,72 ± 0,32	3,10 ± 0,31	4,77 ± 0,44
4mm	10	0,81 ± 0,14	1,73 ± 0,32	3,26 ± 0,21	3,69 ± 0,16	4,41 ± 0,25	5,87 ± 0,14
	11	0,00 ± 0,57	0,45 ± 0,32	1,26 ± 0,45	2,25 ± 0,32	2,97 ± 0,29	4,47 ± 0,45
	12	0,04 ± 0,27	0,38 ± 0,48	0,61 ± 0,48	1,97 ± 0,51	2,33 ± 0,51	2,98 ± 0,50
	13	2,00 ± 0,67	2,38 ± 0,67	2,63 ± 0,70	3,90 ± 0,36	4,89 ± 0,28	6,29 ± 0,20
	14	2,39 ± 0,54	2,92 ± 0,44	4,56 ± 0,84	3,39 ± 0,23	3,72 ± 0,31	1,19 ± 5,57
	15	1,91 ± 0,51	2,31 ± 0,49	4,80 ± 0,26	3,03 ± 0,19	3,55 ± 0,24	5,38 ± 0,15
	16	2,92 ± 0,69	3,63 ± 0,80	5,06 ± 0,26	4,71 ± 0,08	5,14 ± 0,18	5,14 ± 0,20
	17	2,26 ± 0,29	3,08 ± 0,45	4,13 ± 0,55	4,77 ± 0,09	5,39 ± 0,14	6,81 ± 0,14
	18	0,82 ± 0,14	1,59 ± 0,19	3,16 ± 0,39	1,91 ± 0,63	2,42 ± 0,71	3,70 ± 1,52

Výrobní smrštění bylo počítáno pomocí následující rovnice:

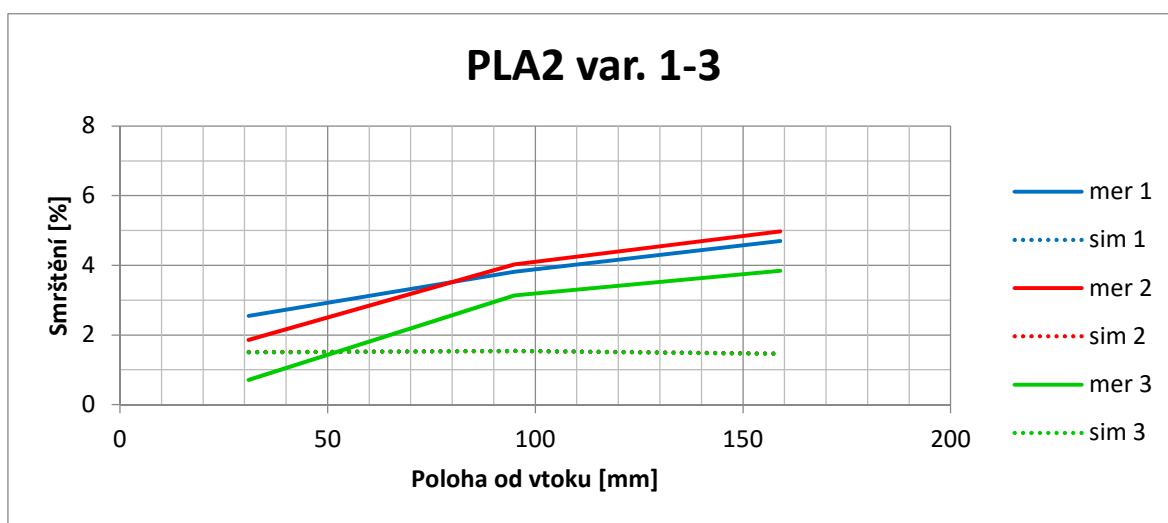
$$S = \frac{X - X_y}{X} 100, \quad (8)$$

kde S je smrštění v jednotkách procent [%], X je rozměr formy [m] a X_y je změřený rozměr v daném místě vzorku [m].

Z naměřených výsledků a vypočtených hodnot smrštění byly připraveny grafické výstupy (obr. 31, obr. 49 a v přílohách obr. 52 - obr. 61), ze kterých jsou patrné vlivy a závislosti vybraných technologických parametrů. V této kapitole jsou popsány průběhy získané z naměřených hodnot neboli experimentu (označených v grafech jako - mer). Zároveň je v grafech zobrazeno vyhodnocení simulace (označených v grafech jako - sim) vstřikovacího procesu a ta je popsána v kapitole 5.10.2.

Jednotlivé vypočtené smrštění z naměřených hodnot pro materiál PLA a tloušťku vzorků 2 mm vykazovaly rostoucí charakter od vtokového ústí směrem k nejvzdálenějšímu místu od vtoku. Pro tento materiál s tloušťkou materiálu 2 mm byla maximální hodnota

lokálního výrobního smrštění 7,99 % a to u varianty číslo 9 (v příloze) v bodě měření B3. Nejnižší hodnota lokálního smrštění byla naměřena u varianty 3 v bodě měření B1 a to 0,71 %. Při porovnání lokálního smrštění pro stejný materiál a tloušťku 4 mm lze konstatovat, že nejvyšší hodnotu lokálního smrštění vykazovala varianta číslo 16 (v příloze) v bodě měření B3 a to 5,06 %. Nejnižší hodnota lokálního smrštění byla naměřena u varianty číslo 11 (v příloze) v bodě měření B1, kde smrštění bylo 0 %. Celkově nejnižší průměrné hodnoty lokálního smrštění pro obě tloušťky stěny výstřiku vykazovala varianta 12 (v příloze). To je v rozporu s teorií, která říká, že s rostoucí tloušťkou by mělo být rostoucí smrštění.



Obr. 31 Porovnání smrštění materiálu PLA 2 mm – varianta 1-3 mezi měřením a simulací

Při porovnání jednotlivých smrštění pro materiál PLLA vidíme, že pro tloušťku 2 mm má smrštění rostoucí charakter, ale pro tloušťku 4 mm lze pozorovat odchylku u varianty číslo 14 (v příloze), kdy smrštění na konci vzorku prudce kleslo. Pro tloušťku 2 mm byla naměřena nejvyšší hodnota smrštění pro variantu číslo 8 v bodě měření B3 (6,22 %) a nejnižší hodnota lokálního smrštění pro variantu číslo 3 v bodě měření B1 (0,00 %). Pro tloušťku 4 mm byla maximální hodnota lokálního smrštění u varianty číslo 17 (v příloze) v bodě měření B3 (6,81 %), nejnižší hodnota smrštění naměřena pro variantu 14 (v příloze) v bodě měření B3 (1,19 %), ale tato hodnota nemusí být považována za správnou, neboť došlo k prudkému poklesu hodnoty smrštění v nejvzdálenějším místě měření od vtoku. Z tohoto důvodu lze považovat za nejnižší hodnotu lokálního smrštění u varianty 18 (v příloze) v bodě měření B1 (1,91 %). Celkově nejnižší průměrné hodnoty lokálního smrštění pro obě tloušťky stěny výstřiku vykazovala varianta 3 (v příloze).

5.7. Vliv technologických parametrů na smrštění dle Taguchiho a metody stupně S/N

Jak již bylo uvedeno, byly pro experiment vybrány varianty a kombinace parametrů, které jsou uvedeny v tab. 9. Pro každý materiál bylo připraveno devět variant s tloušťkami 2 a 4 mm. Z těchto důvodů se *S/N* stupeň počítal pro 18 variant.

Tab. 11 Metoda *S/N*

	Číslo m.	PLA		PLLA	
		MSD	S/N	MSD	S/N
2 mm	1	14,39	-11,58	19,72	-12,95
	2	14,83	-11,71	7,93	-8,99
	3	8,37	-9,23	6,78	-8,31
	4	14,15	-11,51	17,62	-12,46
	5	11,51	-10,61	11,14	-10,47
	6	33,86	-15,30	15,65	-11,95
	7	18,58	-12,69	21,13	-13,25
	8	30,39	-14,83	20,70	-13,16
	9	45,25	-16,56	10,96	-10,40
4 mm	10	4,77	-6,78	22,53	-13,53
	11	0,60	2,23	11,28	-10,52
	12	0,17	7,63	6,04	-7,81
	13	5,52	-7,42	26,20	-14,18
	14	11,69	-10,68	8,92	-9,51
	15	10,66	-10,28	16,93	-12,29
	16	15,77	-11,98	25,00	-13,98
	17	10,55	-10,23	32,71	-15,15
	18	4,39	-6,43	7,74	-8,89

Experimentální data jsou ortogonální řadou transformovány do *S/N* stupně a zobrazeny v tab. 11. Taguchi doporučuje použití *S/N* stupně k vyjádření znaků jakosti odchýlených od požadované hodnoty. Obvykle jsou zde tři kategorie kvalitativní charakteristiky nominal-the-best (nejlepší nominální), the smaller-the-better (nejlepší nejmenší), a the-larger-the-better (nejlepší největší). Optimální stupeň je ten stupeň, který má vyšší hodnotu stupně *S/N*. Díky tomuto vyhodnocení můžeme předurčit nejvhodnější parametry s nejnižší kvalitativní chybou. *MSD* je střední kvadratická odchylka pro výstup definovaná dle následující rovnice

$$MSD = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i^2, \quad (9)$$

kde n je počet míst měření [-] a B je hodnota smrštění v místě měření [%]. Stupeň S/N [-] je logaritmickou funkcí a slouží pro optimalizaci procesu [31], [32], [33].

$$S/N = -10\log(MSD). \quad (10)$$

Tab. 12 Střední hodnota stupně S/N

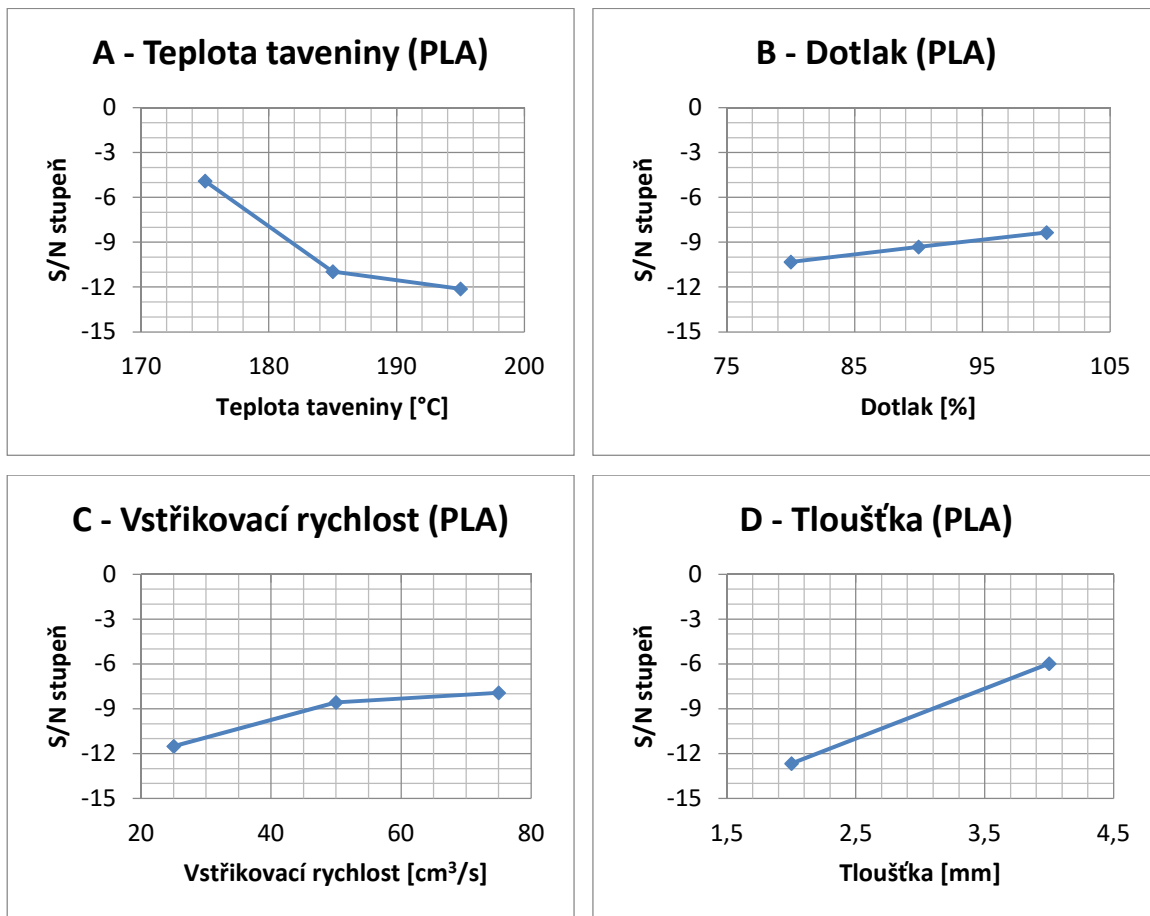
Faktor experimentu	Stupeň experimentu					
	PLA			PLLA		
	1	2	3	1	2	3
A: Teplota taveniny [°C]	-4,907	-10,965	-12,118	-10,353	-11,809	-12,470
B: Dotlak [%]	-10,327	-9,304	-8,359	-13,391	-11,299	-9,940
C: Vstřikovací rychlost [cm³/s]	-11,500	-8,565	-7,926	-13,169	-10,907	-10,554
D: Tloušťka výstřiku [mm]	-12,667	-5,993	-	-11,326	-11,762	-

Pomocí stupně S/N a metody smaller the better byly jednak vyhodnoceny nejvhodnější parametry pro vstřikovací proces zkoumaných materiálů PLA a PLLA z hlediska statistických výpočtů a také vliv jednotlivých parametrů na výrobní smrštění materiálů.

Hodnoty S/N stupně byly vyneseny do grafů na obr. 32 a obr. 33 dle tab. 12 v závislosti na faktorech (parametrech) experimentu. Z těchto grafů byly vyhodnoceny vhodné parametry pro vstřikovací proces vzorků z materiálů PLA a PLLA do formy s patentovanou konstrukcí.

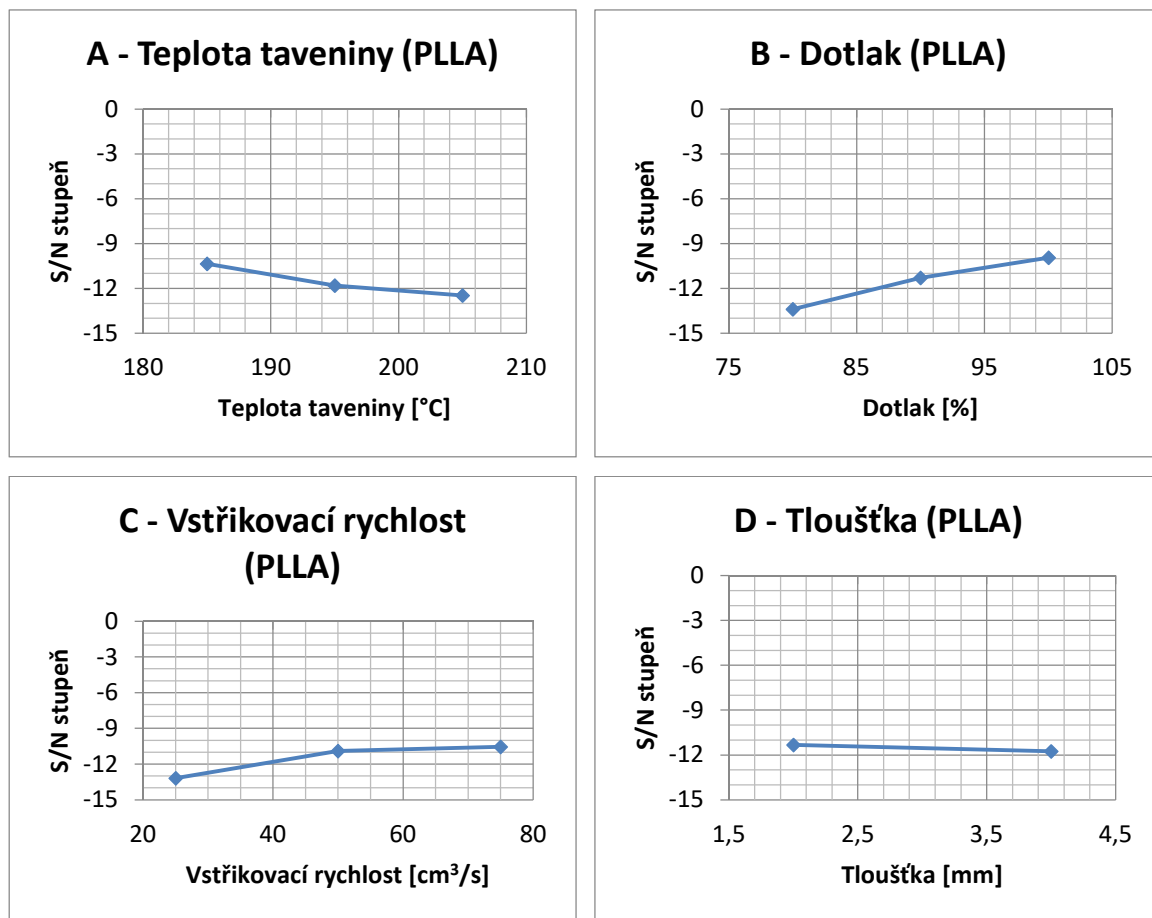
Z hlediska porovnání průběhů vyhodnocených křivek S/N stupně s teorií lze konstatovat, že průběh teploty taveniny v závislosti na S/N stupni koresponduje s teorií na obr. 20. To znamená, že pokud teplota taveniny na obr. 20 stoupá, je předpokládán vznik většího výrobního smrštění. Na obr. 32 s vyhodnocením S/N stupně pro vliv teploty taveniny vyplývá stejný trend, jelikož nejvyšší hodnota S/N stupně (nižší hodnota smrštění) je při nejnižší teplotě, a naopak vyšší smrštění vznikalo při nastavení vstřikovacího parametru teploty taveniny na vyšší hodnotu. Porovnání vlivu vstřikovacího parametru dotlaku mezi teorií na obr. 19 a vyhodnocením S/N stupně na obr. 32 je následující. Jak již bylo uvedeno, optimální stupeň experimentu je ten, který vykazuje nejvyšší hodnotu S/N stupně. Optimální nastavení parametrů pro materiál PLA je kombinace - teplota taveniny 175 °C, dotlak 100 %, vstřikovací rychlost 75 cm³/s a tloušťka výstřiku 4 mm. Dle teorie vyplývá, že při vyšší hodnotě dotlaku je hodnota smrštění nižší, to vyplývá i z vyhodnocení S/N stupně pro dotlak

u materiálu PLA, jelikož vyšší hodnota S/N stupně (nižší hodnota smrštění) je pro vyšší hodnotu dotlaku.



Obr. 32 Stupeň S/N vyhodnocující vliv jednotlivých parametrů vstřikování pro materiál PLA

Porovnání vlivu vstřikovací rychlosti mezi teorií na obr. 18 a vyhodnocením S/N stupně na obr. 32 je následující. Dle teorie vyplývá, že vliv vstřikovací rychlosti je nejednoznačný, to vyplývá i z vyhodnocení S/N stupně u materiálu PLA, kde je průběh takřka rovný. Jeho průběh má trend takový, že se stoupající hodnotou vstřikovací rychlosti je S/N stupeň vyšší (nižší hodnota smrštění). Přesto lze tento výsledek považovat za odpovídající teorii, která je nejednoznačná a zároveň křivka není tak strmá jako např. v porovnání s průběhem S/N stupně teploty taveniny. Posledním porovnávaným vstřikovacím parametrem je vliv tloušťky materiálu. Teorie udává, že s rostoucí tloušťkou roste smrštění, ale u vyhodnocení S/N stupně pro tloušťku je tento trend opačný, jelikož S/N stupeň má vyšší hodnotu (nižší hodnota smrštění) při větší hodnotě tloušťky výstřiku.



Obr. 33 Stupeň S/N vyhodnocující vliv jednotlivých parametrů vstřikování pro materiál PLLA

Optimální nastavení parametrů pro materiál PLLA je kombinace - teplota taveniny 185 °C, dotlak 100 %, vstřikovací rychlost 75 cm³/s a tloušťka výstřiku 2 mm. Z hlediska porovnání průběhů vyhodnocených křivek S/N stupně s teorií u materiálu PLLA lze konstatovat, že průběh teploty taveniny v závislosti na S/N stupni koresponduje s teorií na obr. 20. To znamená, že pokud teplota taveniny na obr. 20 stoupá, je předpokládán vznik většího výrobního smrštění. Na obr. 33 s vyhodnocením S/N stupně pro vliv teploty taveniny vyplývá stejný trend, jelikož nejvyšší hodnota S/N stupně (nižší hodnota smrštění) je při nejnižší teplotě, a naopak vyšší smrštění vznikalo při nastavení vstřikovacího parametru teploty taveniny na vyšší hodnotu. Porovnání vlivu vstřikovacího parametru dotlaku mezi teorií na obr. 19 a vyhodnocením S/N stupně na obr. 33 je následující. Dle teorie vyplývá, že při vyšší hodnotě dotlaku je hodnota smrštění nižší, to vyplývá i z vyhodnocení S/N stupně pro dotlak u materiálu PLLA, jelikož vyšší hodnota S/N stupně (nižší hodnota smrštění) je pro vyšší hodnotu dotlaku. Porovnání vlivu vstřikovací rychlosti mezi teorií na obr. 18 a vyhodnocením S/N stupně na obr. 33 je následující. Dle teorie vyplývá, že vliv

vstřikovací rychlosti je nejednoznačný, to však nevyplývá z vyhodnocení S/N stupně u materiálu PLA. Jeho průběh má trend takový, že se stoupající hodnotou vstřikovací rychlosti je S/N stupeň vyšší (nižší hodnota smrštění). Přesto lze tento výsledek považovat za odpovídající teorii, která je nejednoznačná a zároveň křivka není tak strmá jako např. v porovnání s průběhem S/N stupně dotlaku. Posledním porovnávaným vstřikovacím parametrem je vliv tloušťky materiálu. Teorie udává, že s rostoucí tloušťkou roste smrštění, a i u vyhodnocení S/N stupně pro tloušťku je tento trend stejný, jelikož S/N stupeň má vyšší hodnotu (nižší hodnota smrštění) při menší hodnotě tloušťky výstřiku.

Shrnutím výše uvedených porovnání pro oba materiály PLA a PLLA lze konstatovat, že je shoda mezi průběhy vlivů parametrů na smrštění dle teorií a vyhodnocenými výsledky S/N stupně je téměř shodná. Jenom v případě materiálu PLA a vlivu tloušťky materiálu na smrštění dle S/N stupně je trend opačný.

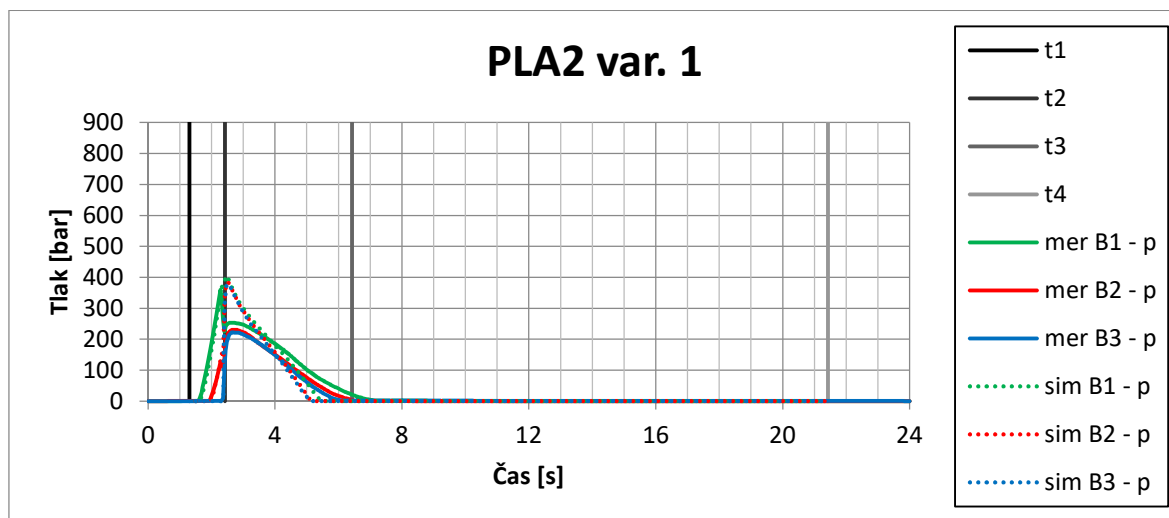
5.8. MĚŘENÍ PRŮBĚHU TLAKU VE FORMĚ

Pro analýzu teploty a tlaku ve formě v průběhu technologického procesu byla použita duální čidla Kistler. Z hlediska snímání tlaku se jedná o piezoelektrické snímače, kde při mechanickém namáhání na čele snímače vzniká elektrický náboj. Jeho zpracováním měřicí systém vyhodnocuje tlak ve formě. Část čidla pro měření teploty je ve formě termočlánku. Tyto čidla mohou být v sériové výrobě propojeny se vstřikovacím strojem a stroj dokáže dle jejich signálů následně řídit proces či pomocí třídící klapky separovat NOK výstřiky v případě poklesu teploty či tlaku. Pro samotný experiment nebyla čidla propojena se vstřikovacím strojem, ale se systémem CoMo DataCenter. Dále bylo na rám formy umístěno čidlo, které snímalo uzavření formy a při impulsu bylo spuštěno samotné měření veličin ve formě. Naměřená data pro hodnoty tlaků v dutině formy jsou vyhodnocena v následujících kapitolách.

5.8.1. VYHODNOCENÍ TLAKOVÝCH PRŮBĚHŮ PRO MATERIÁL PLA

Jednotlivé grafy tlakových průběhů ve formě pro materiál PLA jsou zobrazeny na obr. 34, na obr. 47 a obr. 48 v kapitole 5.10.1 a na obr. 62 - obr. 76 v příloze P3. Toto grafické vyhodnocení je znázorněno pro všechny varianty nastavení dle tab. 8. Varianty 1-18 byly vstřikovány s nastavením dotlaku 80 %, 90 % nebo 100 %. Potom při různých rychlostech vstřikování 25, 50 a 75 cm³/s a při teplotách 175, 185 a 195 °C. Níže jsou popsány jednotlivé průběhy tlaků ve všech polohách měření pro všechny varianty testovaného materiálu PLA.

Ve všech grafech jsou vyznačeny křivky $t1$ - čas zahájení vstřikovací fáze, $t2$ - čas přepnutí na dotlakovou fázi, $t3$ - čas ukončení dotlakové fáze a $t4$ - čas ukončení chlazení.



Obr. 34 Průběh tlaku materiálu PLA 2 mm - varianta 1

PLA 2 mm varianta 1

Tato varianta zobrazená na obr. 34 byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $25 \text{ cm}^3/\text{s}$, teplotě $175 \text{ }^\circ\text{C}$, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15 cm^3 . V grafu můžeme pozorovat dva tlakové vrcholy, které značí předčasné přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vzniknou propady na výstřiku, může docházet i k chybějící části výstřiku a tím k související vzrůstající hodnotě smrštění. Obecně lze říci, že mohou vznikat vzhledové vady při tomto průběhu. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 359 bar, v B2 230 bar a v bodě B3 222 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -129 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,28 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -9 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,88 %.

PLA 2 mm varianta 2

Tato varianta zobrazená na obr. 47 byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplotě $175 \text{ }^\circ\text{C}$, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15 cm^3 . V grafu můžeme pozorovat dva tlakové vrcholy, které značí předčasné přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vzniknou propady na výstřiku, může docházet i k chybějící části výstřiku a tím k související vzrůstající hodnotě smrštění. Obecně lze říci, že mohou vznikat vzhledové vady při tomto průběhu. Maximální

hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 399 bar, v B2 372 bar a v bodě B3 369 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -27 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,17 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -3 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,95 %.

PLA 2 mm varianta 3

Tato varianta zobrazená na obr. 62 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $75 \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplotě $175 \text{ }^\circ\text{C}$, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15 cm^3 . V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 524 bar, v B2 491 bar a v bodě B3 493 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -33 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,42 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 2 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,7 %.

PLA2 varianta 4

Tato varianta zobrazená na obr. 63 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplotě $185 \text{ }^\circ\text{C}$, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15 cm^3 . V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 484 bar, v B2 453 bar a v bodě B3 456 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -31 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,25 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 3 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,77 %.

PLA 2 mm varianta 5

Tato varianta zobrazená na obr. 64 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $75 \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplotě $185 \text{ }^\circ\text{C}$, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15 cm^3 . V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok

na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 541 bar, v B2 512 bar a v bodě B3 517 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -29 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,72 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 5 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,37 %.

PLA 2 mm varianta 6

Tato varianta zobrazená na obr. 65 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 185 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 410 bar, v B2 382 bar a v bodě B3 378 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -28 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,15 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -4 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,08 %.

PLA 2 mm varianta 7

Tato varianta zobrazená na obr. 66 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 75 cm³/s a teplotě 195 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 525 bar, v B2 498 bar a v bodě B3 500 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -27 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,12 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 2 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,86 %.

PLA 2 mm varianta 8

Tato varianta zobrazená na obr. 67 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 195 °C, doba chlazení 15 s, doba

dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 418 bar, v B2 391 bar a v bodě B3 392 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -27 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,16 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 1 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,46 %.

PLA 2 mm varianta 9

Tato varianta zobrazená na obr. 68 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 50 cm³/s a teplotě 195 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 553 bar, v B2 526 bar a v bodě B3 528 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -27 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,39 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 2 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,34 %.

Diskuze získaných hodnot mezi variantami materiálu PLA 2 mm

U porovnání mezi variantami je předpokládáno dle teorie, že vliv rychlosti vstřikování je nejednoznačný, proto byly varianty porovnány při stejných dotlacích nebo teplotě taveniny. Při stejných dotlacích se sledoval vliv teploty taveniny na rozdíl maximálních hodnot tlaku ve vstřikovacím procesu a výrobního smrštění mezi variantami. Při stejné teplotě taveniny se sledoval vliv dotlaku na rozdíl maximálních hodnot tlaku ve vstřikovacím procesu a výrobního smrštění mezi variantami.

Vstřikovací teplota 175 °C, varianty 1-3 (varianta 1 - reference): u varianty 2 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 40 bar, v bodě B2 o 142 bar a v bodě B3 o 147 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,68 %, v bodě B2 o 0,21 % a v bodě B3 o 0,28 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 3 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 124 bar, v bodě B2 o 118 bar a v bodě B3 o 123 bar. Smrštění v bodě B1

změnilo hodnotu o -1,15 %, v bodě B2 o -0,89 % a v bodě B3 o -1,14 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Vstřikovací teplota 185 °C, varianty 4-6 (varianta 4 - reference): u varianty 5 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 57 bar, v bodě B2 o 59 bar a v bodě B3 o 61 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,24 %, v bodě B2 o -0,76 % a v bodě B3 o 0,17 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 6 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -131 bar, v bodě B2 o -129 bar a v bodě B3 o -139 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 3,08 %, v bodě B2 o 2,5 % a v bodě B3 o 2,22 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Vstřikovací teplota 195 °C, varianty 7-9 (varianta 7 - reference): u varianty 8 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -107 bar, v bodě B2 o -107 bar a v bodě B3 o -108 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 1,72 %, v bodě B2 o 0,76 % a v bodě B3 o 1,37 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 9 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 135 bar, v bodě B2 o 135 bar a v bodě B3 o 136 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 1,12 %, v bodě B2 o 1,35 % a v bodě B3 o 1,22 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Dotlak 80 %, varianty 1, 4 a 7 (varianta 1 - reference): u varianty 4 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 125 bar, v bodě B2 o 223 bar a v bodě B3 o 234 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,76 %, v bodě B2 o 0,21 % a v bodě B3 o 0,1 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 7 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 165 bar, v bodě B2 o 268 bar a v bodě B3 o 278 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,12 %, v bodě B2 o 0,72 % a v bodě B3 o 0,7 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20°C.

Dotlak 90 %, varianty 2, 5 a 8 (varianta 2 - reference): u varianty 5 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 141 bar, v bodě B2 o 139 bar a v bodě B3 o 148 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,32 %, v bodě B2 o -0,76 % a v bodě B3 o -0,35 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 8 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 18 bar, v bodě B2 o 19 bar a v bodě B3 o 23 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 2,29 %, v bodě B2 o 1,28 % a v bodě B3 o 1,79 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

Dotlak 100 %, varianty 3, 6 a 9 (varianta 3 - reference): u varianty 6 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -114 bar, v bodě B2 o -108 bar a v bodě B3 o -114 bar.

Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 3,91 %, v bodě B2 o 2,63 % a v bodě B3 o 3,01 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 9 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 29 bar, v bodě B2 o 35 bar a v bodě B3 o 35 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 4,55 %, v bodě B2 o 3,51 % a v bodě B3 o 4,15 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

Jak bylo předpokládáno vlivem parametru teploty taveniny a dotlaku nelze jednoznačně porovnat tyto grafy tímto způsobem a vyhodnotit jednoznačné souvislosti.

PLA 4 mm varianta 10

Tato varianta zobrazená na obr. 48 byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 175 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 5,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 731 bar, v B2 728 bar a v bodě B3 719 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -3 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,92 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -9 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,54 %.

PLA 4 mm varianta 11

Tato varianta zobrazená na obr. 69 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 50 cm³/s a teplotě 175 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 5,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 779 bar, v B2 778 bar a v bodě B3 754 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 0 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,45 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -25 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,81 %.

PLA 4 mm varianta 12

Tato varianta zobrazená na obr. 70 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $75 \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplotě $175 \text{ }^\circ\text{C}$, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 5,01 s a přepnutí na dotlak při objemu $15,5 \text{ cm}^3$. V grafu můžeme pozorovat dva tlakové vrcholy, které značí předčasné přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vzniknou propady na výstřiku, může docházet i k chybějící části výstřiku a tím k související vzrůstající hodnotě smrštění. Obecně lze říci, že mohou vznikat vzhledové vady při tomto průběhu. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 749 bar, v B2 750 bar a v bodě B3 745 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 1 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,34 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -5 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,23 %.

PLA 4 mm varianta 13

Tato varianta zobrazená na obr. 71 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplotě $185 \text{ }^\circ\text{C}$, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 5,01 s a přepnutí na dotlak při objemu $15,5 \text{ cm}^3$. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 761 bar, v B2 747 bar a v bodě B3 714 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -14 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,38 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -33 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,25 %.

PLA 4 mm varianta 14

Tato varianta zobrazená na obr. 72 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $75 \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplotě $185 \text{ }^\circ\text{C}$, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 5,01 s a přepnutí na dotlak při objemu $15,5 \text{ cm}^3$. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 665 bar, v B2 674 bar a v bodě B3 669 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 9 bar a hodnota smrštění se změnila

o 0,53 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -5 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,63 %.

PLA 4 mm varianta 15

Tato varianta zobrazená na obr. 73 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 185 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 5,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 687 bar, v B2 693 bar a v bodě B3 688 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 6 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,41 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -5 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,48 %.

PLA 4 mm varianta 16

Tato varianta zobrazená na obr. 74 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 75 cm³/s a teplotě 195 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 5,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 657 bar, v B2 667 bar a v bodě B3 663 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 11 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,71 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -5 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,43 %.

PLA 4 mm varianta 17

Tato varianta zobrazená na obr. 75 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 195 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 5,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 652 bar, v B2 664 bar a v bodě B3 653 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 11 bar a hodnota smrštění se změnila

o 0,82 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -11 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,05 %.

PLA 4 mm varianta 18

Tato varianta zobrazená na obr. 76 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 50 cm³/s a teplotě 195 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 5,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 15,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 724 bar, v B2 737 bar a v bodě B3 728 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 12 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,77 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -8 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,58 %.

Diskuze získaných hodnot mezi variantami materiálu PLA 4 mm

U porovnání mezi variantami je předpokládáno dle teorie, že vliv rychlosti vstřikování je nejednoznačný, proto byly varianty porovnány při stejných dotlacích nebo teplotě taveniny. Při stejných dotlacích se sledoval vliv teploty taveniny na rozdíl maximálních hodnot tlaku ve vstřikovacím procesu a výrobního smrštění mezi variantami. Při stejné teplotě taveniny se sledoval vliv dotlaku na rozdíl maximálních hodnot tlaku ve vstřikovacím procesu a výrobního smrštění mezi variantami.

Vstřikovací teplota 175 °C, varianty 10-12 (varianta 10 - reference): u varianty 11 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 48 bar, v bodě B2 o 50 bar a v bodě B3 o 35 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,81 %, v bodě B2 o -1,28 % a v bodě B3 o -2 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 12 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -29 bar, v bodě B2 o -28 bar a v bodě B3 o -9 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 0,04 %, v bodě B2 o -0,07 % a v bodě B3 o -0,65 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Vstřikovací teplota 185 °C, varianty 13-15 (varianta 13 - reference): u varianty 14 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -96 bar, v bodě B2 o -73 bar a v bodě B3 o -46 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 0,39 %, v bodě B2 o 0,55 % a v bodě B3 o 1,93 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 15 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 22 bar, v bodě B2 o 19 bar a v bodě B3 o 20 bar. Smrštění v bodě

B1 změnilo hodnotu o -0,49 %, v bodě B2 o -0,61 % a v bodě B3 o 0,24 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Vstřikovací teplota 195 °C, varianty 16-18 (varianta 16 - reference): u varianty 17 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -4 bar, v bodě B2 o -4 bar a v bodě B3 o -10 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,66 %, v bodě B2 o -0,55 % a v bodě B3 o -0,93 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 18 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 72 bar, v bodě B2 o 73 bar a v bodě B3 o 76 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -1,44 %, v bodě B2 o -1,49 % a v bodě B3 o -0,97 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Dotlak 80 %, varianty 10, 13 a 16 (varianta 10 - reference): u varianty 13 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 30 bar, v bodě B2 o 19 bar a v bodě B3 o -5 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 1,19 %, v bodě B2 o 0,65 % a v bodě B3 o -0,64 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 16 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -74 bar, v bodě B2 o -61 bar a v bodě B3 o -56 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 2,11 %, v bodě B2 o 1,9 % a v bodě B3 o 1,8 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

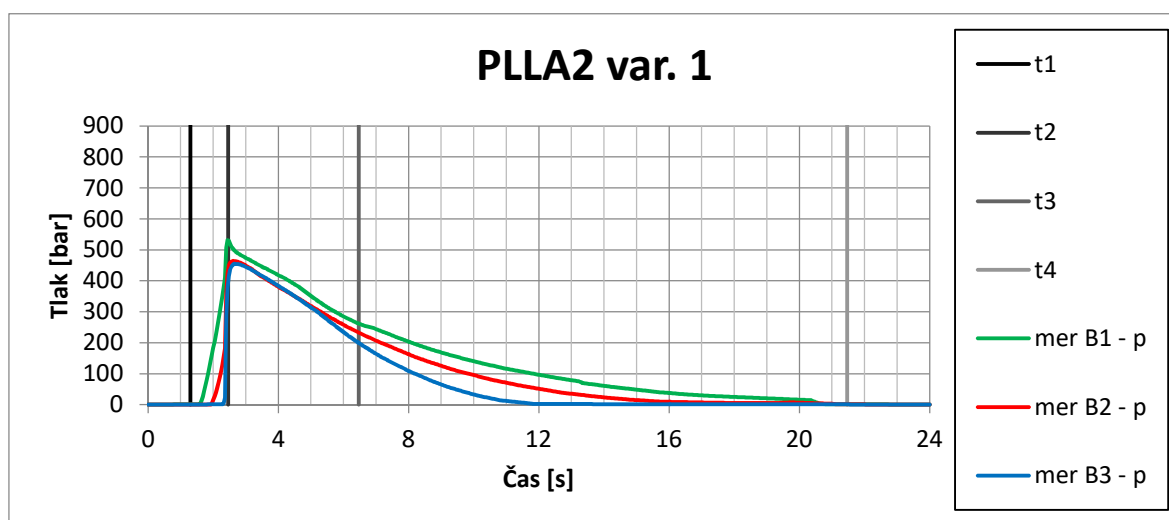
Dotlak 90 %, varianty 11, 14 a 17 (varianta 11 - reference): u varianty 14 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -113 bar, v bodě B2 o -104 bar a v bodě B3 o 85 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 2,39 %, v bodě B2 o 2,47 % a v bodě B3 o 3,3 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 17 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -126 bar, v bodě B2 o -115 bar a v bodě B3 o -101 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 2,26 %, v bodě B2 o 2,62 % a v bodě B3 o 2,87 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

Dotlak 100 %, varianty 12, 15 a 18 (varianta 12 - reference): u varianty 15 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -62 bar, v bodě B2 o -57 bar a v bodě B3 o 57 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 1,87 %, v bodě B2 o 1,94 % a v bodě B3 o 4,19 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 18 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -25 bar, v bodě B2 o -13 bar a v bodě B3 o -17 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 0,78 %, v bodě B2 o 1,21 % a v bodě B3 o 2,55 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

Jak bylo předpokládáno vlivem parametru teploty taveniny a dotlaku nelze jednoznačně porovnat tyto grafy tímto způsobem a vyhodnotit jednoznačné souvislosti.

5.8.2. VYHODNOCENÍ TLAKOVÝCH PRŮBĚHŮ PRO MATERIÁL PLLA

Jednotlivé grafy tlakových průběhů ve formě pro materiál PLLA jsou zobrazeny na obr. 35 v následujícím textu a na obr. 77 - obr. 93 v příloze P3. Toto grafické vyhodnocení je znázorněno pro všechny varianty nastavení dle tab. 8. Varianty 1-18 byly vstřikovány s nastavením dotlaku 80 %, 90 % nebo 100 %. Potom při rychlostech vstřikování 25, 50 a 75 cm³/s a při teplotách 185, 195 a 205 °C. Níže jsou popsány jednotlivé průběhy tlaků ve všech polohách pro všechny varianty testovaného materiálu PLLA. Ve všech grafech jsou vyznačeny křivky $t1$ - čas zahájení vstřikovací fáze, $t2$ - čas přepnutí na dotlakovou fázi, $t3$ - čas ukončení dotlakové fáze a $t4$ - čas ukončení chlazení.



Obr. 35 Průběh tlaku materiálu PLLA 2 mm - varianta 1

PLLA 2 mm varianta 1

Tato varianta zobrazená na obr. 35 byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 185 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 14 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 532 bar, v B2 464 bar a v bodě B3 455 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -67 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,19 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -10 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,42 %.

PLLA 2 mm varianta 2

Tato varianta zobrazená na obr. 77 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 50 cm³/s a teplotě 185 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 14 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 611 bar, v B2 553 bar a v bodě B3 557 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -58 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,44 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 3 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,43 %.

PLLA 2 mm varianta 3

Tato varianta zobrazená na obr. 78 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 75 cm³/s a teplotě 185 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 14 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 689 bar, v B2 642 bar a v bodě B3 644 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -47 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,07 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 2 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,94 %.

PLLA 2 mm varianta 4

Tato varianta zobrazená na obr. 79 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 50 cm³/s a teplotě 195 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 14 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 636 bar, v B2 583 bar a v bodě B3 583 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil

v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -53 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,73 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 0 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,43 %.

PLLA 2 mm varianta 5

Tato varianta zobrazená na obr. 80 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 75 cm³/s a teplotě 195 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 14 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 694 bar, v B2 648 bar a v bodě B3 652 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -45 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,86 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 3 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,81 %.

PLLA 2 mm varianta 6

Tato varianta zobrazená na obr. 81 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 195 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 14 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 591 bar, v B2 543 bar a v bodě B3 541 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -48 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,27 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -3 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,67 %.

PLLA 2 mm varianta 7

Tato varianta zobrazená na obr. 82 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 75 cm³/s a teplotě 205 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 14 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu

výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 651 bar, v B2 610 bar a v bodě B3 613 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -40 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,89 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 2 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,35 %.

PLLA 2 mm varianta 8

Tato varianta zobrazená na obr. 83 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 205 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 14 cm³. V grafu můžeme pozorovat dva tlakové vrcholy, které značí předčasné přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vzniknou propady na výstřiku, může docházet i k chybějící části výstřiku a tím k související vzrůstající hodnotě smrštění. Obecně lze říci, že mohou vznikat vzhledové vady při tomto průběhu. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 501 bar, v B2 462 bar a v bodě B3 455 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -40 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,11 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -7 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,9 %.

PLLA 2 mm varianta 9

Tato varianta zobrazená na obr. 84 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 50 cm³/s a teplotě 205 °C, doba chlazení 15 s, doba dotlaku 4,01 s a přepnutí na dotlak při objemu 14 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 600 bar, v B2 569 bar a v bodě B3 571 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -32 bar a hodnota smrštění se změnila o 2,38 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o 2 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,67 %.

Diskuze získaných hodnot mezi variantami materiálu PLLA 2 mm

U porovnání mezi variantami je předpokládáno dle teorie, že vliv rychlosti vstřikování je nejednoznačný, proto byly varianty porovnány při stejných dotlacích nebo teplotě taveniny. Při stejných dotlacích se sledoval vliv teploty taveniny na rozdíl maximálních hodnot tlaku ve vstřikovacím procesu a výrobního smrštění mezi variantami.

Při stejné teplotě taveniny se sledoval vliv dotlaku na rozdíl maximálních hodnot tlaku ve vstřikovacím procesu a výrobního smrštění mezi variantami.

Vstřikovací teplota 185 °C, varianty 1-3 (varianta 1 - reference): u varianty 2 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 80 bar, v bodě B2 o 89 bar a v bodě B3 o 102 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -2,05 %, v bodě B2 o -1,79 % a v bodě B3 o -1,77 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 3 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 78 bar, v bodě B2 o 89 bar a v bodě B3 o 88 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,21 %, v bodě B2 o -0,58 % a v bodě B3 o -0,08 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Vstřikovací teplota 195 °C, varianty 4-6 (varianta 4 - reference): u varianty 5 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 57 bar, v bodě B2 o 65 bar a v bodě B3 o 69 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -1,23 %, v bodě B2 o -1,1 % a v bodě B3 o 0,71 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 6 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -103 bar, v bodě B2 o -105 bar a v bodě B3 o -111 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 0,41 %, v bodě B2 o 0,81 % a v bodě B3 o 0,67 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Vstřikovací teplota 205 °C, varianty 7-9 (varianta 7 - reference): u varianty 8 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -150 bar, v bodě B2 o -149 bar a v bodě B3 o -158 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,48 %, v bodě B2 o -0,27 % a v bodě B3 o 0,29 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 9 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 99 bar, v bodě B2 o 107 bar a v bodě B3 o 116 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -1,48 %, v bodě B2 o -1,22 % a v bodě B3 o -1,44 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Dotlak 80 %, varianty 1, 4 a 7 (varianta 1 - reference): u varianty 4 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 104 bar, v bodě B2 o 119 bar a v bodě B3 o 128 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 0,11 %, v bodě B2 o -0,35 % a v bodě B3 o -0,34 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 7 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 119 bar, v bodě B2 o 146 bar a v bodě B3 o 158 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 0,44 %, v bodě B2 o 0,14 % a v bodě B3 o 0,07 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

Dotlak 90 %, varianty 2, 5 a 8 (varianta 2 - reference): u varianty 5 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 82 bar, v bodě B2 o 95 bar a v bodě B3 o 95 bar.

Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 0,93 %, v bodě B2 o 0,35 % a v bodě B3 o 0,72 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 8 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -110 bar, v bodě B2 o -91 bar a v bodě B3 o -101 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 2 %, v bodě B2 o 1,66 % a v bodě B3 o 2,13 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

Dotlak 100 %, varianty 3, 6 a 9 (varianta 3 - reference): u varianty 6 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -98 bar, v bodě B2 o -99 bar a v bodě B3 o -104 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 1,54 %, v bodě B2 o 1,74 % a v bodě B3 o 1,47 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 9 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -89 bar, v bodě B2 o -74 bar a v bodě B3 o -73 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 0,72 %, v bodě B2 o 1,03 % a v bodě B3 o 0,76 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

Jak bylo předpokládáno vlivem parametru teploty taveniny a dotlaku nelze jednoznačně porovnat tyto grafy tímto způsobem a vyhodnotit jednoznačné souvislosti.

PLLA 4 mm varianta 10

Tato varianta zobrazená na obr. 85 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 185 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 7 s a přepnutí na dotlak při objemu 12,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 684 bar, v B2 683 bar a v bodě B3 669 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -1 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,72 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -14 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,46 %.

PLLA 4 mm varianta 11

Tato varianta zobrazená na obr. 86 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 50 cm³/s a teplotě 185 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 7 s a přepnutí na dotlak při objemu 12,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 765 bar, v B2 764 bar a v bodě B3 754 bar. Maximální

vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -1 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,72 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -10 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,5 %.

PLLA 4 mm varianta 12

Tato varianta zobrazená na obr. 87 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $75 \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplotě 185°C , doba chlazení 25 s, doba dotlaku 7 s a přepnutí na dotlak při objemu $12,5 \text{ cm}^3$. V grafu můžeme pozorovat dva tlakové vrcholy, které značí předčasné přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vzniknou propady na výstřiku, může docházet i k chybějící části výstřiku a tím k související vzrůstající hodnotě smrštění. Obecně lze říci, že mohou vznikat vzhledové vady při tomto průběhu. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 756 bar, v B2 759 bar a v bodě B3 755 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 2 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,36 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -4 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,65 %.

PLLA 4 mm varianta 13

Tato varianta zobrazená na obr. 88 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $50 \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplotě 195°C , doba chlazení 25 s, doba dotlaku 7 s a přepnutí na dotlak při objemu $12,5 \text{ cm}^3$. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 744 bar, v B2 751 bar a v bodě B3 739 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 7 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,99 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -12 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,4 %.

PLLA 4 mm varianta 14

Tato varianta zobrazená na obr. 89 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti $75 \text{ cm}^3/\text{s}$ a teplotě 195°C , doba chlazení 25 s, doba dotlaku 7 s a přepnutí na dotlak při objemu $12,5 \text{ cm}^3$. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok

na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 748 bar, v B2 728 bar a v bodě B3 722 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -20 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,32 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -6 bar a hodnota smrštění se změnila o -2,53 %.

PLLA 4 mm varianta 15

Tato varianta zobrazená na obr. 90 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 195 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 7 s a přepnutí na dotlak při objemu 12,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 750 bar, v B2 756 bar a v bodě B3 749 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 6 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,52 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -6 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,83 %.

PLLA 4 mm varianta 16

Tato varianta zobrazená na obr. 91 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 80 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 75 cm³/s a teplotě 205 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 7 s a přepnutí na dotlak při objemu 12,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat ostrou tlakovou špičku, to značí pozdní přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vznikne přetok na výstřiku, může docházet k pootevření formy a s tím související snižování hodnoty smrštění až přecházení na rozpínání výstřiku. Dále dochází k vyššímu pnutí v materiálu výstřiku a k namáhání vstřikovací formy a stroje. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 757 bar, v B2 748 bar a v bodě B3 717 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o -9 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,43 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -31 bar a hodnota smrštění se změnila o 0 %.

PLLA 4 mm varianta 17

Tato varianta zobrazená na obr. 92 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 90 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 25 cm³/s a teplotě 205 °C, doba chlazení 25 s, doba

dotlaku 7 s a přepnutí na dotlak při objemu 12,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat plynulý přechod ze vstřikovací fáze do fáze dotlakové. To může znamenat, že při tomto nastavení by mohly vznikat optimální podmínky pro výrobu výstřiku bez zásadních vad. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 722 bar, v B2 731 bar a v bodě B3 723 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 9 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,62 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -8 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,42 %.

PLLA 4 mm varianta 18

Tato varianta zobrazená na obr. 93 (v příloze P3) byla vstřikována při parametrech 100 % dotlaku, vstřikovací rychlosti 50 cm³/s a teplotě 205 °C, doba chlazení 25 s, doba dotlaku 7 s a přepnutí na dotlak při objemu 12,5 cm³. V grafu můžeme pozorovat dva tlakové vrcholy, které značí předčasné přepnutí na dotlak. To může znamenat, že vzniknou propady na výstřiku, může docházet i k chybějící části výstřiku a tím k související vzrůstající hodnotě smrštění. Obecně lze říci, že mohou vznikat vzhledové vady při tomto průběhu. Maximální hodnota tlaku v bodě měření B1 byla 757 bar, v B2 762 bar a v bodě B3 756 bar. Maximální vstřikovací tlak se změnil v bodě 2 vzhledem k bodu 1 o 5 bar a hodnota smrštění se změnila o 0,51 %. V bodě 3 vzhledem k bodu 1 došlo ke změně o -6 bar a hodnota smrštění se změnila o 1,29 %.

Diskuze získaných hodnot mezi variantami materiálu PLLA 4 mm

U porovnání mezi variantami je předpokládáno dle teorie, že vliv rychlosti vstřikování je nejednoznačný, proto byly varianty porovnány při stejných dotlacích nebo teplotě taveniny. Při stejných dotlacích se sledoval vliv teploty taveniny na rozdíl maximálních hodnot tlaku ve vstřikovacím procesu a výrobního smrštění mezi variantami. Při stejné teplotě taveniny se sledoval vliv dotlaku na rozdíl maximálních hodnot tlaku ve vstřikovacím procesu a výrobního smrštění mezi variantami.

Vstřikovací teplota 185 °C, varianty 10-12 (varianta 10 - reference): u varianty 11 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 80 bar, v bodě B2 o 81 bar a v bodě B3 o 85 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -1,44 %, v bodě B2 o -1,44 % a v bodě B3 o -1,4 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 12 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -9 bar, v bodě B2 o -5 bar a v bodě B3 o 1 bar. Smrštění v bodě

B1 změnilo hodnotu o -0,29 %, v bodě B2 o -0,65 % a v bodě B3 o -1,49 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Vstřikovací teplota 195 °C, varianty 13-15 (varianta 13 - reference): u varianty 14 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 4 bar, v bodě B2 o -23 bar a v bodě B3 o -17 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,5 %, v bodě B2 o -1,17 % a v bodě B3 o -5,1 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 15 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 2 bar, v bodě B2 o 28 bar a v bodě B3 o 27 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,36 %, v bodě B2 o -0,17 % a v bodě B3 o 4,19 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Vstřikovací teplota 205 °C, varianty 16-18 (varianta 16 - reference): u varianty 17 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -36 bar, v bodě B2 o -17 bar a v bodě B3 o 6 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 0,06 %, v bodě B2 o 0,25 % a v bodě B3 o 1,66 % vlivem nárůstu dotlaku o 10 %. U varianty 18 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 35 bar, v bodě B2 o 31 bar a v bodě B3 o 33 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -2,86 %, v bodě B2 o -2,97 % a v bodě B3 o -3,1 % vlivem nárůstu dotlaku o 20 %.

Dotlak 80 %, varianty 10, 13 a 16 (varianta 10 - reference): u varianty 13 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 59 bar, v bodě B2 o 67 bar a v bodě B3 o 70 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 0,2 %, v bodě B2 o 0,47 % a v bodě B3 o 0,42 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 16 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 73 bar, v bodě B2 o 65 bar a v bodě B3 o 48 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 1,01 %, v bodě B2 o 0,72 % a v bodě B3 o -0,73 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

Dotlak 90 %, varianty 11, 14 a 17 (varianta 11 - reference): u varianty 14 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -17 bar, v bodě B2 o -36 bar a v bodě B3 o 32 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 1,14 %, v bodě B2 o 0,75 % a v bodě B3 o -3,27 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 17 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -43 bar, v bodě B2 o -33 bar a v bodě B3 o -31 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 2,52 %, v bodě B2 o 2,42 % a v bodě B3 o 2,34 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

Dotlak 100 %, varianty 12, 15 a 18 (varianta 12 - reference): u varianty 15 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o -7 bar, v bodě B2 o -3 bar a v bodě B3 o -5 bar.

Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o 1,07 %, v bodě B2 o 1,23 % a v bodě B3 o 2,41 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 10 °C. U varianty 18 v bodě B1 došlo ke změně maximální hodnoty tlaku o 0 bar, v bodě B2 o 3 bar a v bodě B3 o 1 bar. Smrštění v bodě B1 změnilo hodnotu o -0,05 %, v bodě B2 o 0,09 % a v bodě B3 o 0,73 % vlivem nárůstu teploty taveniny o 20 °C.

Jak bylo předpokládáno vlivem parametru teploty taveniny a dotlaku nelze jednoznačně porovnat tyto grafy tímto způsobem a vyhodnotit jednoznačné souvislosti.

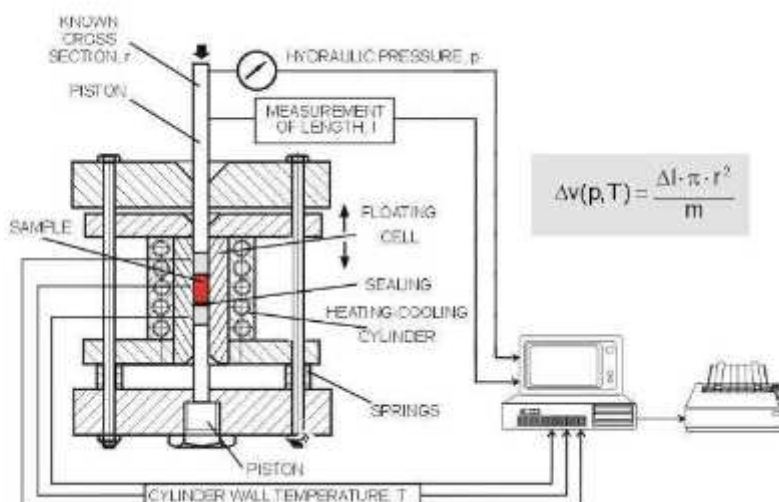
5.9. MATERIÁLOVÁ DATA PRO SIMULACI

Pro relevantní výstupy ze simulace bylo zapotřebí naměřit hodnoty pro p-v-T digram zkoumaných polymerů. Proto bylo provedeno měření p-v-T dat na přístroji SWO Polymertechnik PVT 100, který je zobrazen na obr. 36. Měření probíhalo v uzavřené cele, do které je vložen vybraný materiál. Tlak uvnitř je omezován pomocí síly, která drží píst, jak je zobrazeno na obr. 37. Při přípravě křivek pro materiál PLA se vyskytl problém, neboť tento materiál při vysokých tlacích protékal mezi PTFE těsněním, které slouží pro zamezení průtoku roztaveného plastu mezi pístem a stěnou komory na zkušebním stroji.



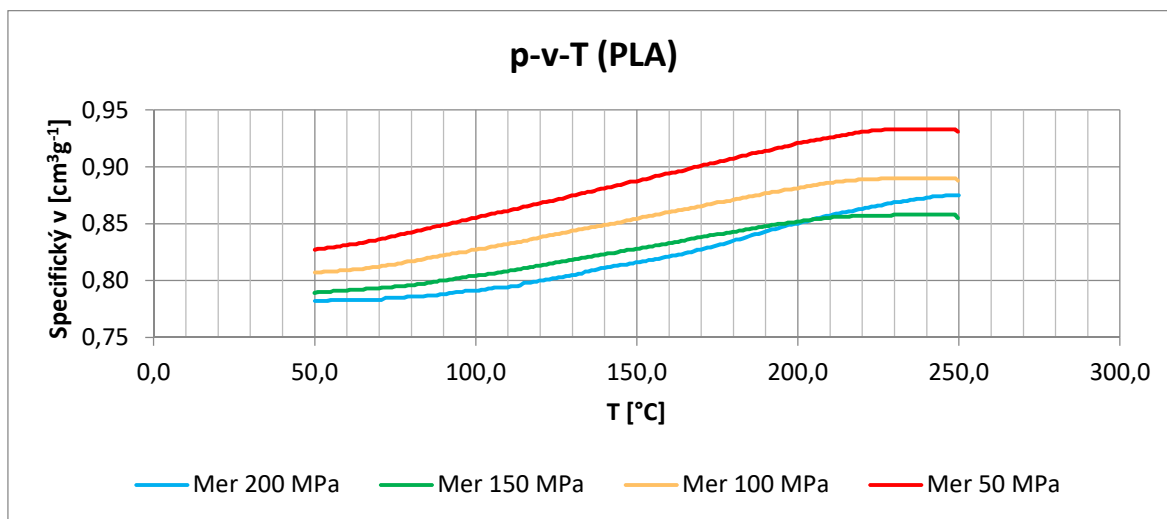
Obr. 36 Polymertechnik PVT 100. [52]

Diagramy p-v-T pro oba materiály jsou na obr. 38 a obr. 39. V nich jsou znázorněny závislosti měrného objemu na teplotě při různých tlacích. V těchto diagramech můžeme popsat jednotlivé fáze vstřikovacího procesu.



Obr. 37 SWO Schématický diagram přístroje PVT 100 [53]

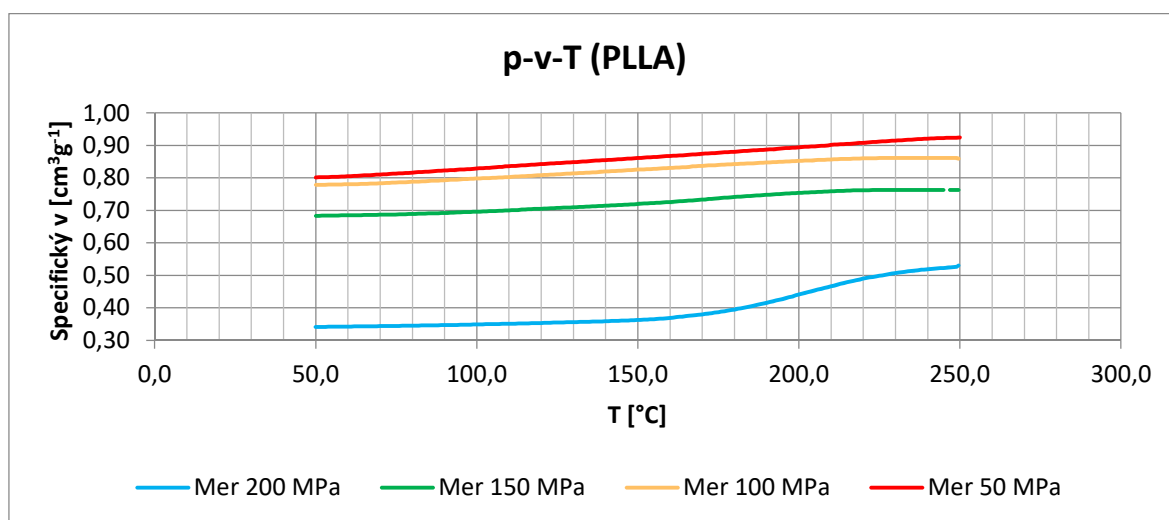
Při stanovení p-v-T diagramu pro materiál PLA došlo při tlaku 200 MPa k protečení části materiálu z komory kolem těsnění. Z tohoto důvodu můžeme pozorovat posunutou křivku pro tlak 200 MPa. Jelikož má těsnění určitou toleranci, není možné úniku zabránit. Problémem je nízká viskozita taveniny, která umožní protečení mezi těsněním a válcem. Z tohoto důvodu se tato oblast nedoporučuje využívat pro vstřikovací proces, aby nedocházelo k poškození formy.



Obr. 38 p-v-T diagram pro materiál PLA

Při vstřikování materiálů PLA a PLLA do experimentální formy byly nastavené parametry teploty v oblasti 190 °C. Je to oblast, kde materiál vykazuje jeho běžnou viskozitu a nedochází k protečení mimo hlavní část formy tedy tvarovou dutinu.

Pokud by se udělala rekonstrukce vstřikovacího procesu v p-v-T diagramech bylo by možné pozorovat, že při ohřevu materiálu a plastikaci v komoře začíná narůstat tlak právě vlivem změny teploty. Následně by začala vstřikovací fáze a docházelo by k prudkému nárůstu tlaku až do jeho maxima. Tato fáze by obsahovala nejenom objemové naplnění dutiny formy, ale také stlačování taveniny. Dle měření tlaku ve formě pro PLA bychom se nacházeli v oblasti mezi křivkami tlaku 50-80 MPa a pro PLLA 70-80 MPa. Potom by docházelo k přepnutí na dotlak a dle časového záznamu tlak mírně klesal. To by v p-v-T diagramu znamenalo, že se takřka pohybujeme po vrstevnici tlaku směrem k nižší teplotě taveniny. Jelikož vtok na konci dotlaku je již ztuhlý, nemá smysl se snažit přidávat materiál do dutiny, proto následuje izochorické chlazení pro tlak odpovídající atmosférickému tlaku. Zbývá část chlazení je již bez působení tlaku v dutině nad rámec atmosférického tlaku a chlazení mimo formu. Tyto fáze zásadně ovlivňují kvalitu výstřiku a jeho výsledné vlastnosti v našem případě především sledované smrštění.



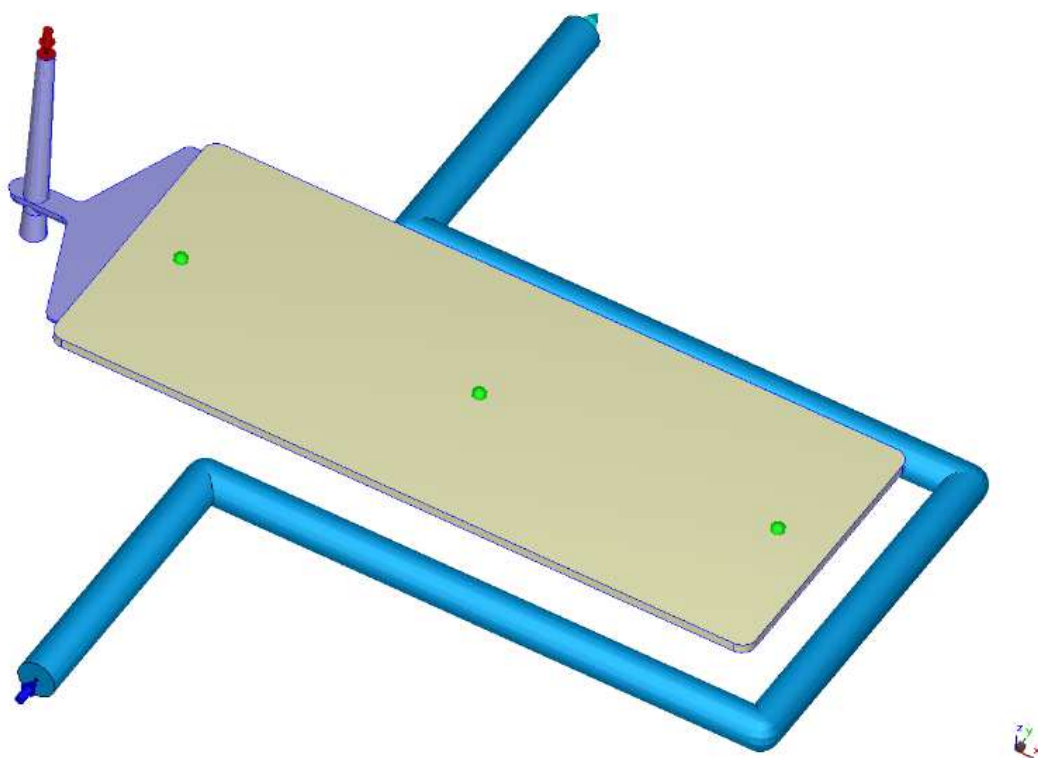
Obr. 39 p-v-T diagram pro materiál PLLA

Samotné chlazení výstřiku probíhá ve formě již ve fázi vstřikování, kdy se tavenina dotkne stěny vtokového ústí nebo stěn tvarové dutiny a chlazení pokračuje dále ve fázi dotlaku. Vstřikovací cyklus je dokončen po chlazení bez tlaku, kdy se forma otevře a výstřik je vyjmut ze vstřikovací formy. Následně výrobek chladne již mimo vstřikovací formu a postupně dosáhne teploty okolí, tedy výchozího bodu. Je nutné zmínit, že pro rekonstrukci průběhu chování taveniny v tvarové dutině jsou časové průběhy tlaku a teploty závislé na poloze měřeného místa. To znamená, že pokud jsme měřili ve třech bodech stěny výstřiku, pohybovali jsme se v jiných místech p-v-T diagramu. Konkrétně, pokud bychom použili pro

rekonstrukci procesu naměřené teploty, zjistili bychom, že tavenina na povrchu rychle ztuhla a teplotní senzor zaznamenal jen mírný ohřev nad teplotu temperace. Proto bychom se při této rekonstrukci průběhu vstřikování na povrchu výstřiku dostali do oblasti teploty 27 °C, tedy mimo naměřenou oblast p-v-T diagramu. Z toho důvodu zde není rekonstrukce průběhu vstřikování naznačena v p-v-T diagramech. Získané a naměřené diagramy byly použity s kombinací dostupných materiálových knihoven k vlastní analýze tečení.

5.10. SIMULAČNÍ ANALÝZA

Analýza tečení je využívána k optimalizaci procesu před samotným procesem vstřikování. Pomocí programu můžeme vyhodnotit, zda je správně umístěn vtok, kde se budou tvořit studené spoje, ale také můžeme simulovat chování taveniny v dutině formy a vyhodnotit například smrštění.

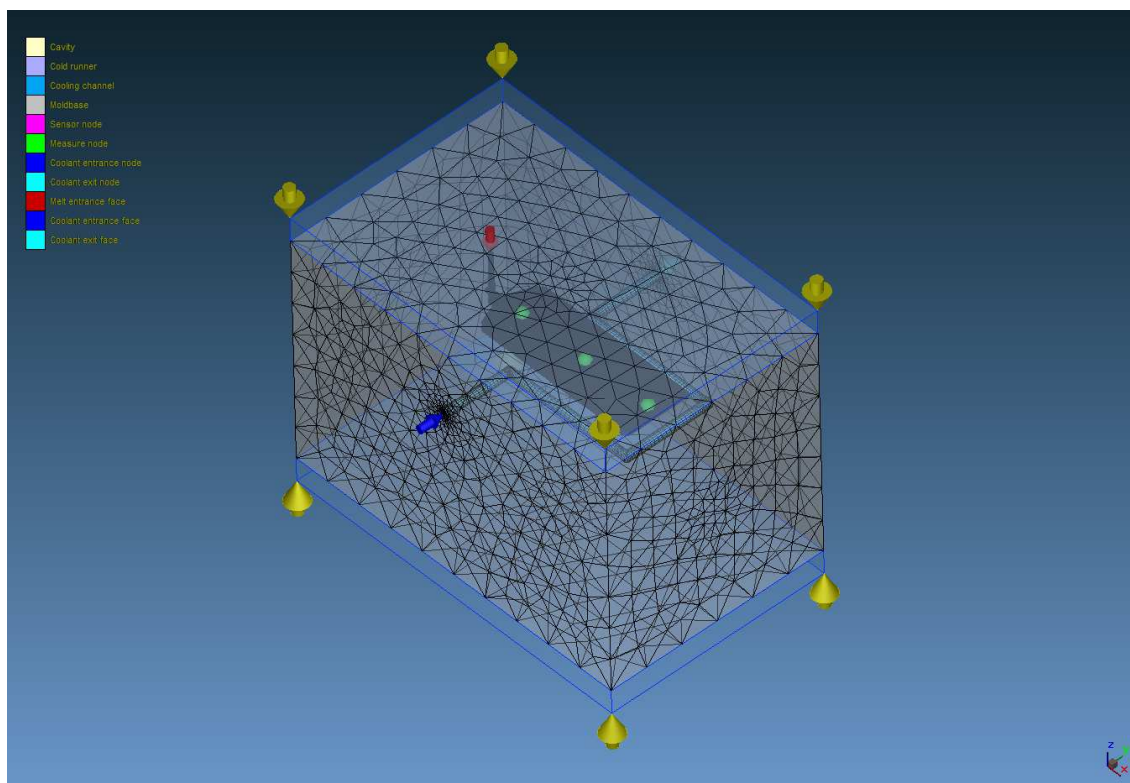


Obr. 40 Umístění vtoku, tvar výstřiku a model chladicího okruhu

Pro materiál PLA byla připravena analýza tečení a to pro vzorky o tloušťce 2 mm a 4 mm. Analýza tečení byla připravena v programu Moldex3D, verze x64 R 14.0, což je simulační software pro oblast vstřikování plastových dílů. Pro analýzu tečení byly použity

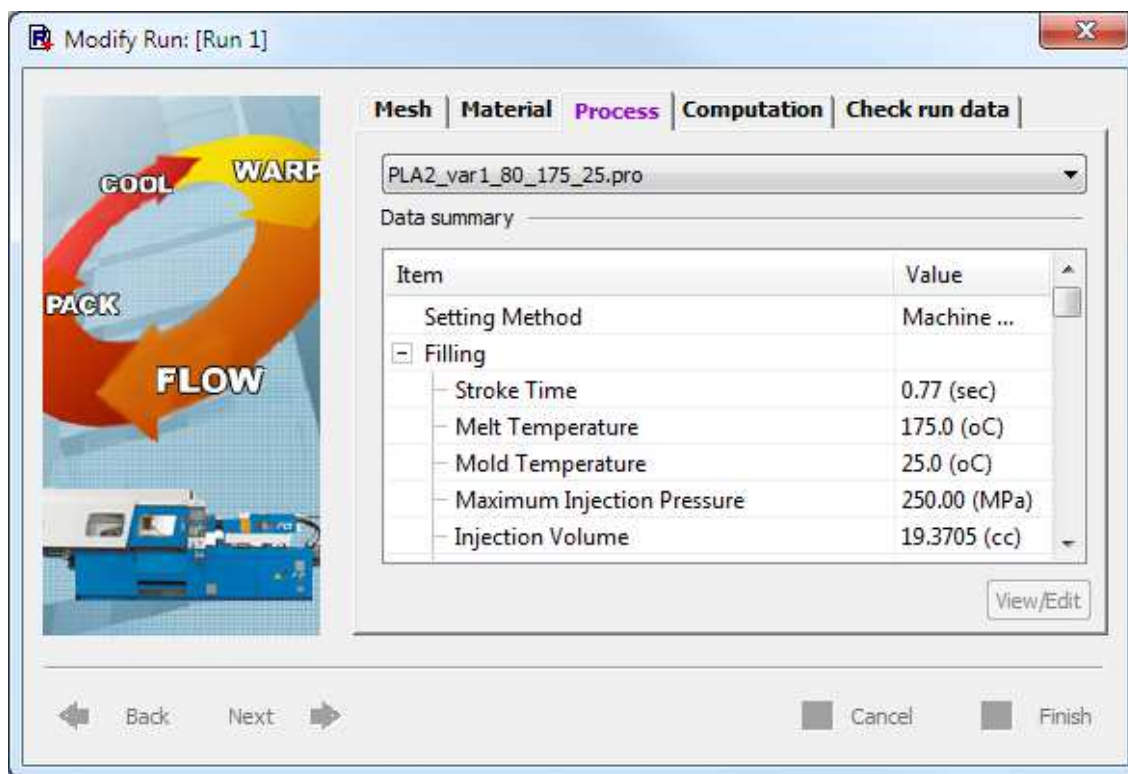
hodnoty, které byly použity při vlastním procesu vstřikování, aby bylo možné porovnat a verifikovat data z reálného procesu.

Pro analýzu tečení byl připraven 3D model výstřiku, kde je i 3D model vtoku, viz obr. 40. Jedná se o filmový vtok s rozměry 53 x 0,85 mm. V obrázku je i model chladicího okruhu o průměru 8 mm. To vše bylo připravováno v softwaru Moldex3D, kde prvně byly načteny tyto 3D modely a jim přiděleny funkce. To znamená, že jednotlivým modelům bylo nastaveno, zda se jedná o výstřik, studený vtok nebo chladicí okruh. Pro vtok byl nastaven vstupní bod, to je bod, kde je při simulaci přiváděn vstřikovaný materiál. To je možné vidět na obr. 41 ve formě červené šipky. Dále byl přidán vstup a výstup do chladicího okruhu ve formě, tj. modrá a světle zelená šipka. Pro získání průběhů tlaku a případně teploty musely být v projektu umístěny tzv. senzory. Jejich souřadnice odpovídají stejné poloze jako v reálné vstřikovací formě. Pro ověření smrštění, které bylo vyhodnoceno z naměřených hodnot tloušťky, bylo potřeba pro simulaci umístit na spodní a horní straně modelu výstřiku měřicí body zobrazené zeleně. Posledním prvkem je model vstřikovací formy. Následoval krok nastavení velikostí prvku sítě a vytvoření sítě prvků. Konečný výsledek je na obr. 41.



Obr. 41 Vysíťovaný model výstřiku včetně chladicího kanálu a formy

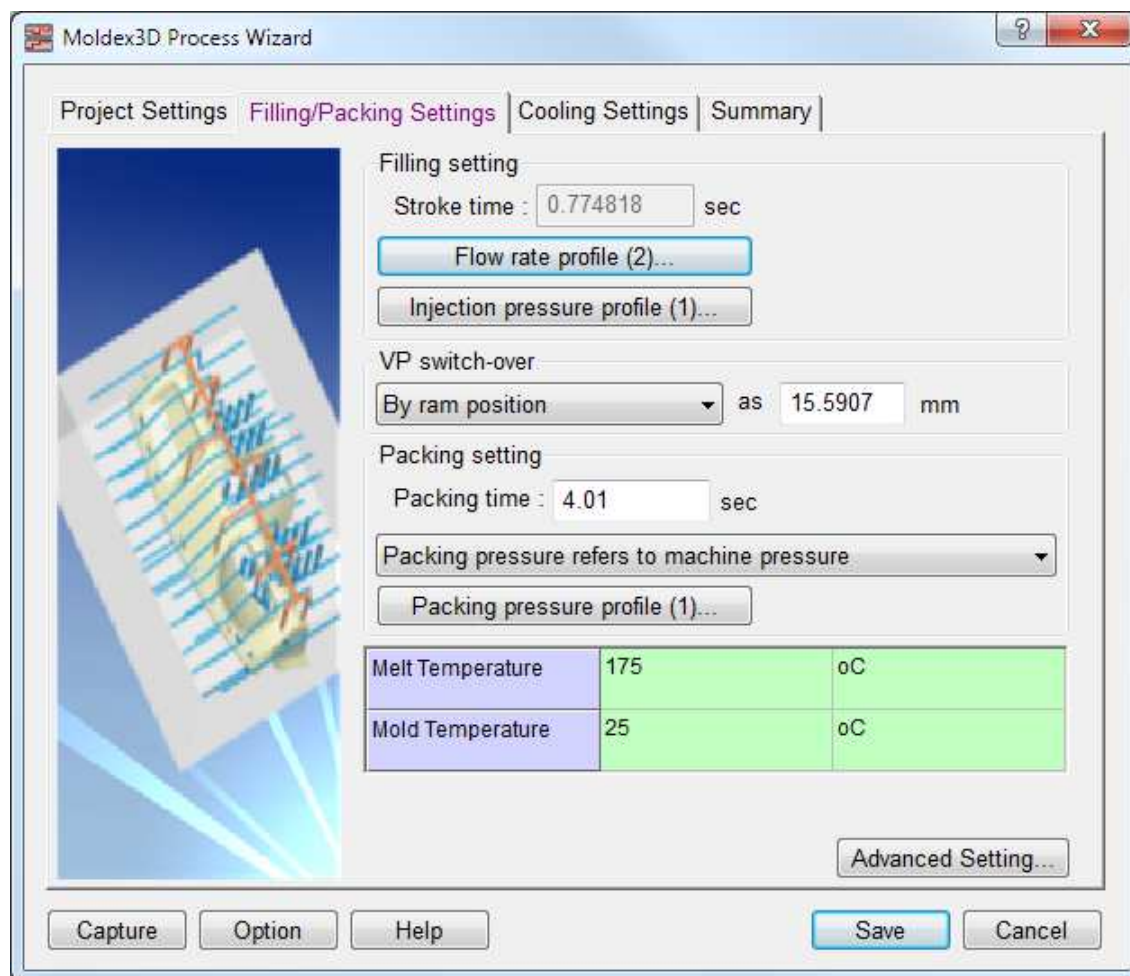
Následovala fáze simulace jednotlivých nastavených variant pro materiál PLA tzv. „Run“. Prvně byla vytvořena první úloha v softwaru a byla načtena vytvořená síť. Následně byl nastaven materiál, vstřikovací stroj, vstřikovací parametry, chladicí okruh, materiál formy. Simulace vstřikovacího procesu byla nastavena na tzv. „Transient analysis 3“ obsahující jednotlivé fáze tranzientního chlazení, plnění dotlaku, chlazení a tzv. „Warpage“ pro vyhodnocení smrštění.



Obr. 42 Nastavení Run

Těchto úloh (Run) bylo vytvořeno 18 tak, jako je variant pro materiál PLA. A pro jednotlivé úlohy byly nastaveny parametry pomocí rozhraní na obr. 42, kde se načítá vytvořená „mesh“, nastavuje materiál, proces vstřikování a nastavení výpočtů při simulaci. V nastavení procesu se dále nastavují vstřikovací rychlosti, teplota, dotlak atd. To je zobrazeno na obr. 43. Vstřikovací rychlost vstřikovací fáze byla nastavena ve „Flow rate profile“, kde je nastaven profil vstřikování, to znamená dle nastavení uživatele např. závislost vstřikovací rychlosti na poloze čela šneku ve vstřikovací jednotce. Toto nastavení odpovídá vstřikovacímu objemu, který byl 35 cm³ pro PLA2 a 55 cm³ pro PLA 4. Dále je zde nastaven profil vstřikovacího tlaku. V podstatě se jedná o nastavení maximálního

vstřikovacího tlaku v závislosti na poloze čela šneku. Také se zde nastavuje, kdy je přepnuto na dotlak. V našem případě podle polohy čela šneku.



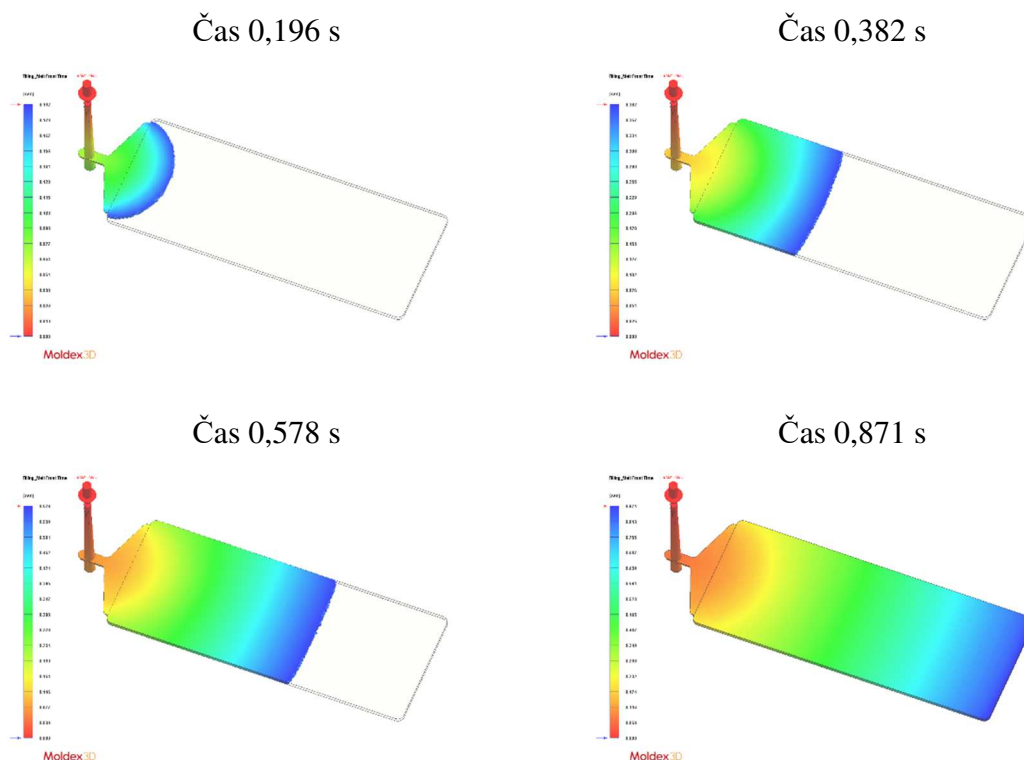
Obr. 43 Nastavení procesu vstřikování

To odpovídalo přepnutí dle objemu s hodnotou 15 cm³ pro PLA2 a PLA4. Nastaven byl také čas dotlaku a hodnota dotlaku v tzv. „Packing pressure profile“. Dále byla nastavena teplota vstřikování, teplota formy a v dalších záložkách čas chlazení atd. Všechny tyto parametry byly nastaveny stejně, jako bylo při reálném vstřikování výstřiků na stroji Arburg. Po nastavení všech potřebných parametrů byly spuštěny simulace vstřikovacího procesu pro všechny varianty materiálu PLA.

Z výsledků lze pozorovat např. průběh plnění dutiny formy materiálem PLA, zobrazené na obr. 44 pro variantu 1. Plnění bylo řízeno tak, aby tavenina nevtékala do tvarové dutiny volným tokem, ale postupně – laminárně. [13], [32], [36] Materiál v dutině postupně tuhne po jednotlivých vrstvách. Jelikož se nejedná o členitý výstřik, ale o jednoduchý geometrický tvar, je rychlost taveniny nejvyšší uprostřed stěny výstřiku.

Připravené výstřiky pro všechny varianty parametrů byly plněny rovnoměrně bez vzniku staženin a studených spojů.

Samozřejmě je k dispozici řada dalších výstupů a výsledků, ale pro porovnání průběhu tlaku a smrštění se tato práce v následujících kapitolách zaměří právě na tyto výsledky simulací.

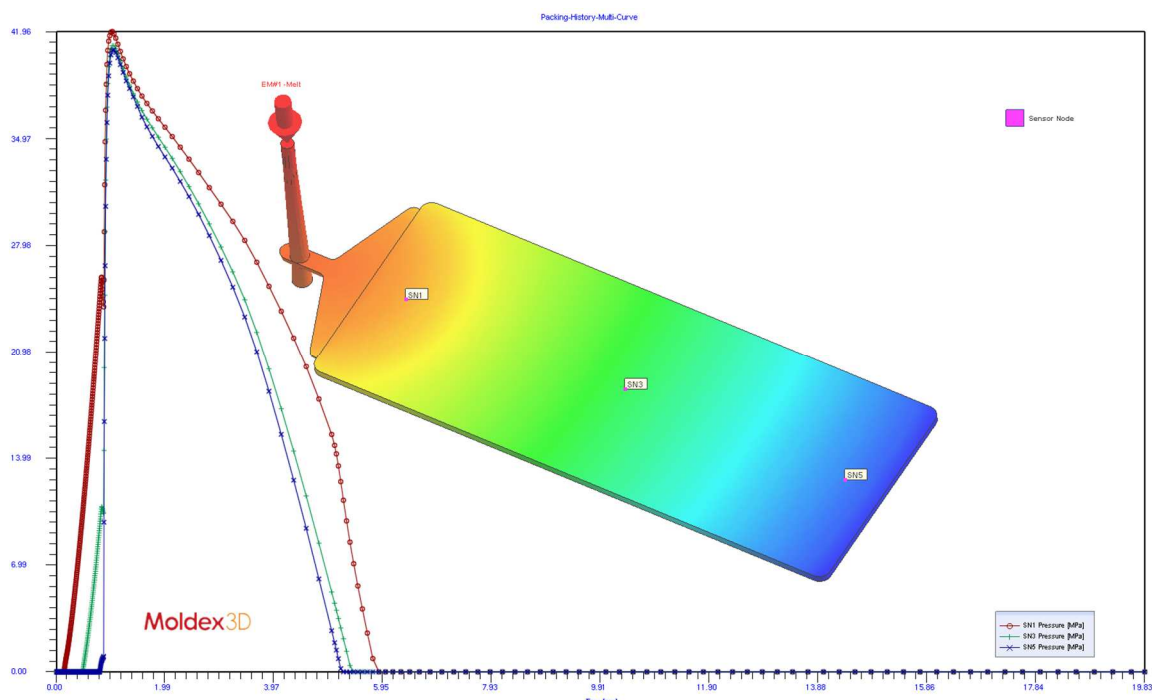


Obr. 44 Průběh plnění PLA 2 mm

5.10.1. VYHODNOCENÍ TLAKU

Na následujícím grafu obr. 45 jsou znázorněny průběhy tlaků v měřených místech pomocí senzorů. V simulačním programu byly jednotlivé tlaky vyhodnoceny v jednotkách MPa, při samotném experimentu pomocí tlakových čidel v jednotkách bar a proto průběhy tlaku ze simulace vstřikovacího procesu byly přepočítány na jednotku bar. Při plnění dochází k uvolnění napětí tečení plastu a v důsledku toho k následnému poklesu tlaku během plnění fáze v závislosti na poloze od vtoku [54], [55]. To je vidět na vybraném průběhu ze simulace pro PLA 2mm a variantu 8. Na obrázku jsou naznačeny tzv. senzory v simulaci, pomocí nich uživatel může získat např. průběhy tlaku nebo změny teploty během vstřikovacího cyklu. V grafu jsou vidět tři křivky odpovídající těmto polohám senzorů a je vidět ze simulace, že nejvyšší tlak byl nejbližší ke vtoku a naopak nejmenší hodnota tlaku v nejvzdálenějším

senzoru, což je dáno pasivními odpory při tečení taveniny plastu. V první fázi je v průbězích vidět jak postupně začínal narůstat tlak v jednotlivých senzorech, kdy v nejvzdálenějším místě senzoru k nárůstu začne docházet, až když tavenina projde okolo prvních dvou senzorů.

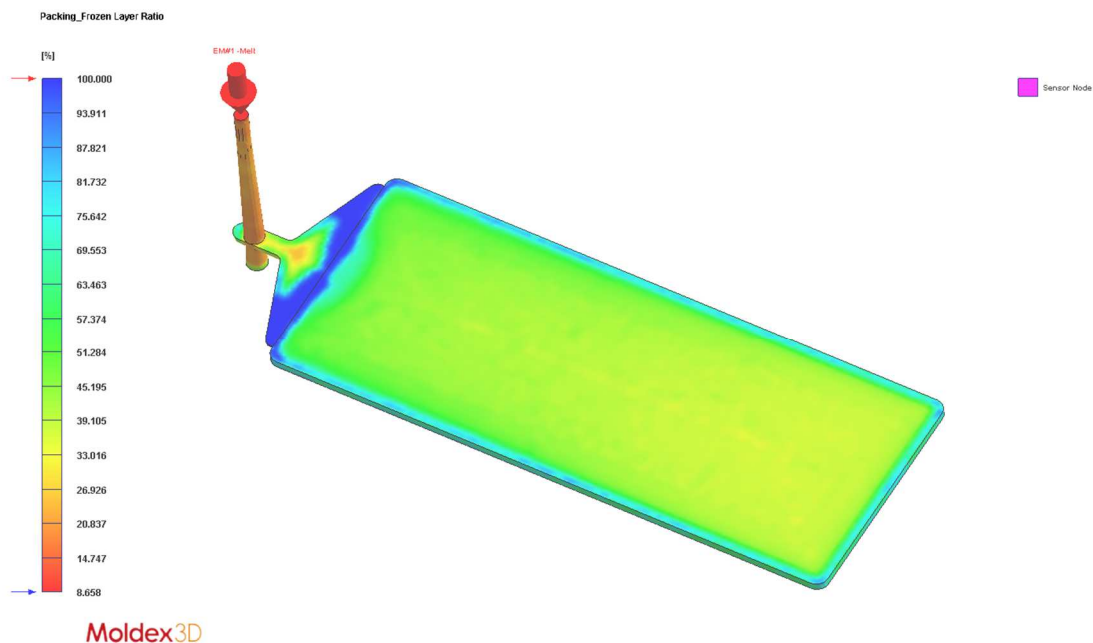


Obr. 45 Průběh tlaku PLA 2 mm - varianta 8

V grafech obr. 34, obr. 47, obr. 62 až obr. 68 jsou znázorněny průběhy tlaků pro materiál PLA 2 mm a pro jednotlivé varianty a kombinace technologických parametrů. Zde jsou již porovnány naměřená data s daty ze simulace vstřikovacího procesu, které byly získány např. z grafu na obr. 45. Ve všech grafech jsou vyznačeny křivky t_1 - čas zahájení vstřikovací fáze, t_2 - čas přepnutí na dotlačkovou fázi, t_3 - čas ukončení dotlačkové fáze a t_4 - čas ukončení chlazení. Na obr. 48 a obr. 69 - obr. 76 v příloze P3 jsou zobrazena porovnání experimentálně naměřených dat a dat ze simulací pro materiál PLA 4 mm a pro jednotlivé varianty dle Tagguchiho metody.

Při analýze naměřených a simulovaných průběhů tlaků lze říci, že u většiny porovnání ve fázi vstřikování se křivky shodují. Avšak ve fázi dotlaku již v mnoha případech dochází ke značným rozdílům. Pokud je porovnání zaměřeno na maximální dosažený tlak, tak z grafů vyplývá, že pro materiál PLA 2 mm a variantu 4, 6, 8, 9 se dají výsledky považovat za velmi shodné. V ostatních případech PLA 2 mm jsou hodnoty tlaku v simulaci vyšší až v řádech stovek barů oproti experimentu. Při další analýze průběhu tlaku při

dotlakové fázi v jednotlivých senzorech lze jednoznačně usoudit, že pokles tlaku je mnohem výraznější oproti experimentálně naměřeným hodnotám a to ve všech variantách nastavení technologických parametrů.



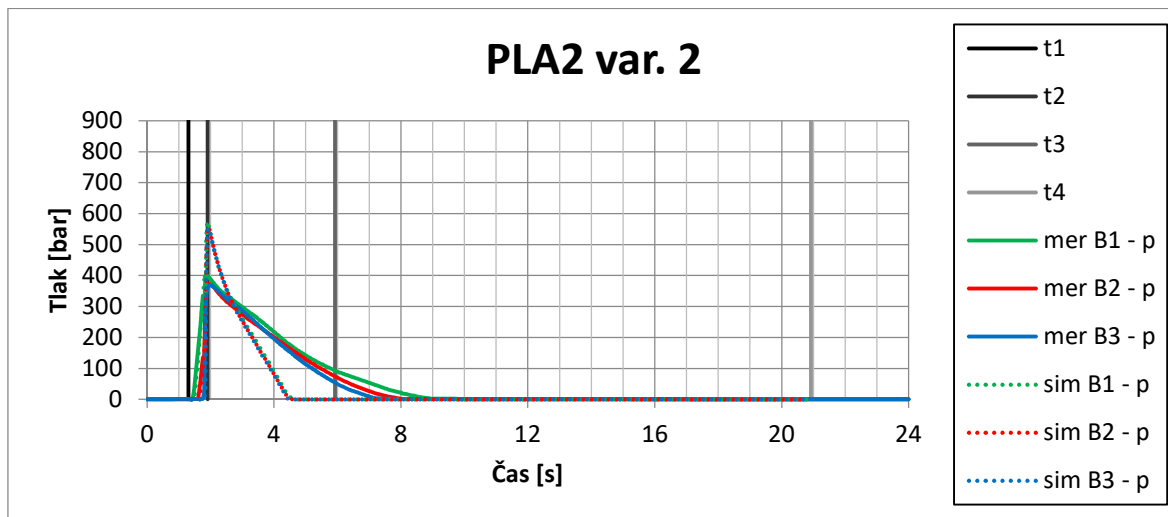
Obr. 46 Zamrznutí vtoku u PLA 2 mm - varianta 1

Dle obr. 46 lze říci, že došlo při simulaci vstřikovacího procesu k zamrznutí vtoku již v průběhu dotlaku. To je zobrazeno na obrázku modrou barvou. To způsobilo, že hodnota dotlaku již nemohla ovlivňovat tlaky na jednotlivých senzorech v průběhu celé dotlakové fáze a tím došlo k prudkému poklesu tlaku v místech senzorů. Nejlepší shoda se dá přiřadit variantě 8.

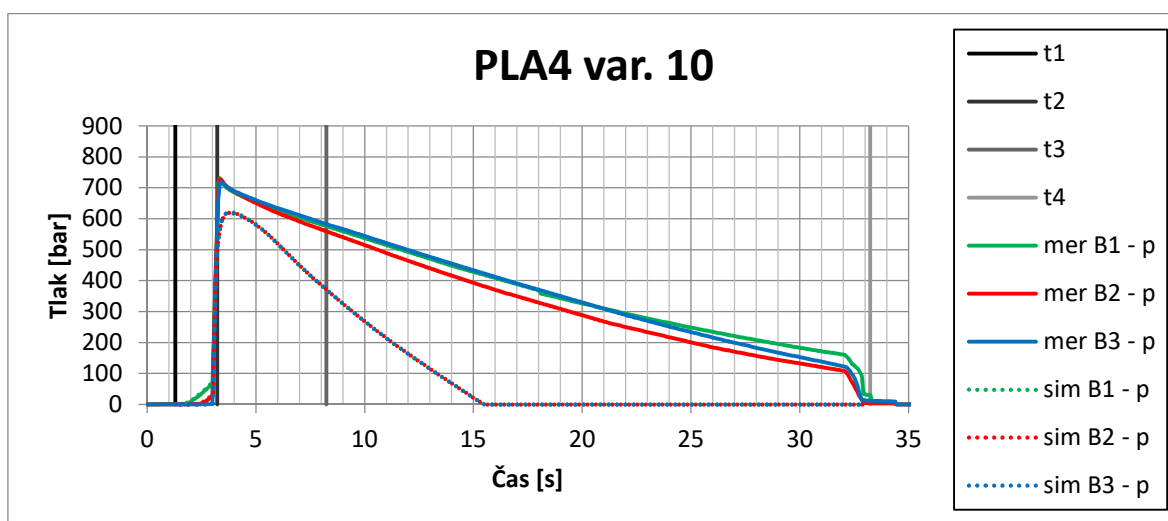
Porovnání pro PLA4 je zobrazeno na obr. 48 a obr. 69 - obr. 76 v příloze P3 pro jednotlivé varianty výstřiku. Ve většině variant 10-18 je ve fázi vstřikování průběh tlaku shodný, ale opět dochází k rozdílům v dotlakové fázi.

Pokud je porovnání zaměřeno i na dosažení maximální hodnoty tlaku, tak se dají považovat za dobré výsledky varianty 11, 12, 13, 14 a 16. U ostatních jsou opět rozdíly až v řádech stovek barů (u simulace vyšší hodnota). Nejlepší shoda výsledků se zdá být u varianty 16 z hlediska průběhu tlaku. Z hlediska průběhu tlaku v dotlakové fázi jsou průběhy ze simulace oproti experimentálnímu měření strmější, ale oproti variantě PLA 2 mm pokračuje průběh nenulového tlaku i do fáze chlazení. Přesto v časovém měřítku dojde k poklesu tlaku na hodnotu tlaku okolí mnohem dříve a to u všech variant. Dle výsledků

simulace v případě PLA 4 mm docházelo ke ztrátě tlaku před koncem dotlaku, proto tlaky v jednotlivých pozicích senzoru nemohly být ovlivněny až do konce dotlakové fáze a proto došlo k rychlejšímu poklesu tlaku.



Obr. 47 Průběh tlaku materiálu PLA 2 mm - varianta 2

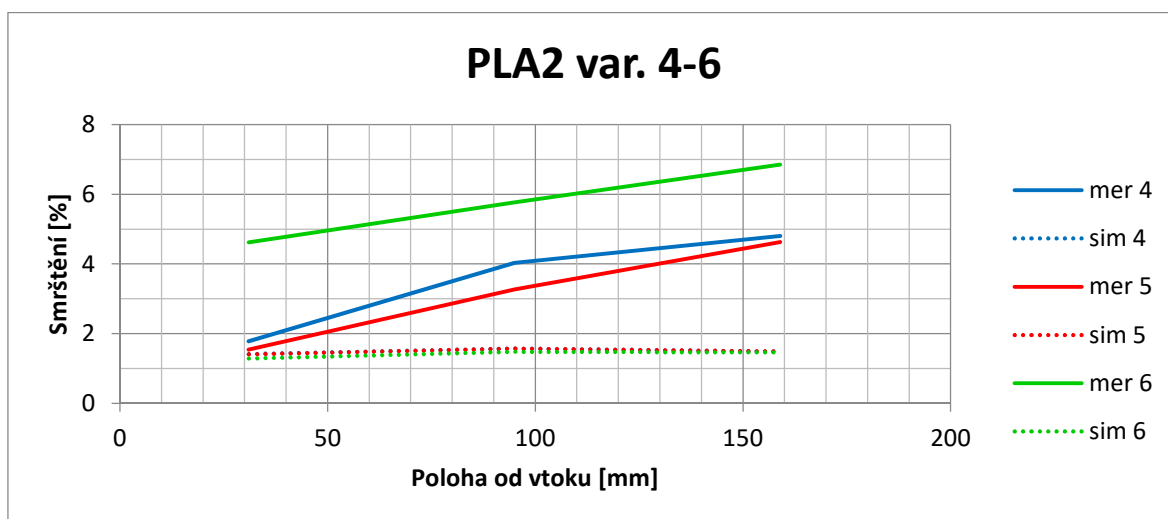


Obr. 48 Průběh tlaku materiálu PLA 4 mm - varianta 10

5.10.2. VYHODNOCENÍ SMRŠTĚNÍ

Pro analýzu smrštění tloušťky v bodech senzorů byly do simulace přidány měřicí body na protilehlých plochách tloušťky. Na konci simulace průběhu vstřikování byla vyhodnocena tzv. analýza Warpage, pomocí které bylo možné zjistit například objemové smrštění, ale také především deformaci a polohu deformovaných nodů reprezentující měřicí body. Za předpokladu, že je sledována jenom změna tloušťky, byla tato tloušťka vyhodnocena ze změn polohy nodů ve směru osy Z, která je ve směru tloušťky výstřiku.

Z výsledků pro materiál PLA vyplývá pro jednotlivé varianty 1-18 na obr. 31, obr. 49 a v příloze obr. 52 - obr. 55, že u smrštění vyhodnocené ze simulace nedochází k zásadní shodě průběhů křivek. To může být způsobeno volbou velikosti sítě simulace, modelem materiálu, nebo simulací odvodušňovacích kanálů (v softwaru Moldex3D tzv. venting). Také je důležité zmínit, že nesouhlasí předpokládaný zvyšující se trend smrštění se zvětšující vzdáleností od vtoku. Dokonce ze simulace vyplývá, že maximální smrštění je v poloze senzoru B2 uprostřed výstřiku. A dokonce u některých variant na konci výstřiku v bodě měření B3 je smrštění menší než u vtoku. Vysvětlením může být, že při simulaci docházelo k dřívějšímu zamrznutí vtoku, než u experimentu. To způsobilo, že již pomocí dotlaku nebyl do těchto míst přesunut další materiál, aby zde naopak bylo menší smrštění a tím došlo k opačnému efektu při simulaci. To znamená, aby nastalo nejmenší smrštění u vtoku a největší smrštění nejdále od vtoku.



Obr. 49 Porovnání smrštění materiálu PLA 2 mm – varianta 4-6 mezi měřením a simulací

6 DISKUZE

V rámci disertační práce bylo vyhodnoceno výrobní smrštění z naměřených dat po 24 hodinách od vyrobení pro různé konstrukční, technologické a materiálové vlivy. Dále byl zkoumán vliv vzdálenosti toku taveniny na průběh smrštění v závislosti na vzdálenosti od vtoku. Byly analyzovány průběhy tlaku ve formě a provedena simulace vstřikovacího procesu.

		PLA								PLLA									
Variantá	Tloušťka výstřiku	Dotlak [%]	Rychlost vstřiková ní [ccm/s]	Teplota taveniny [°C]	Min. smršťení v bodě měření	Max. smršťení v bodě měření	Min. průměrné smršťení	Taguchiho metoda	Pruběh tlaku	Nejvhodnější nastavení	Dotlak [%]	Rychlost vstřiková ní [ccm/s]	Teplota taveniny [°C]	Min. smršťení v bodě měření	Max. smršťení v bodě měření	Min. průměrné smršťení	Taguchiho metoda	Pruběh tlaku	Nejvhodnější nastavení
1	2 mm	80	25	175					Pr		80	25	185					Po	
2		90	50	175					Pr		90	50	185					Po	
3		100	75	175	*				Po		100	75	185	*		*	*	Po	
4		80	50	185					OK		80	50	195					Po	
5		90	75	185					Po		90	75	195					Po	
6		100	25	185					OK		100	25	195					OK	
7		80	75	195					Po		80	75	205					Po	
8		90	25	195					OK		90	25	205		*			Pr	
9		100	50	195		*			Po		100	50	205					OK	
10	4 mm	80	25	175					Po		80	25	185					OK	
11		90	50	175	*				Po		90	50	185					OK	
12		100	75	175			*	*	Po		100	75	185					Pr	
13		80	50	185					Po		80	50	195					Po	
14		90	75	185					OK		90	75	195	*				Po	
15		100	25	185					OK		100	25	195					OK	
16		80	75	195		*			OK		80	75	205					Po	
17		90	25	195					OK		90	25	205		*			OK	
18		100	50	195					OK		100	50	205					Pr	

Obr. 50 Celkové vyhodnocení

Ze získaných výsledků a grafických závislostí vyplynuly tyto závěry, přínosy a doporučení pro teorii, praxi a byl navržen další postup výzkumu.

6.1. DISKUZE VÝSLEDKŮ Z HLEDISKA TEORETICKÝCH POZNATKŮ

6.1.1. VÝROBNÍ SMRŠTĚNÍ

Z výsledků vyhodnoceného výrobního smrštění na obr. 31, obr. 49 a obr. 52 - obr. 61 vyplývá jednoznačná závislost na poloze od vtoku. To znamená, že čím dále od vtoku bylo smrštění vyhodnoceno, tím větší smrštění bylo. To koresponduje s teoretickými

předpoklady, které jsou formulovány stejným způsobem. Je nutné podotknout, že tento trend nebyl dodržen u varianty 14 pro PLLA s parametry vstřikování zobrazených na obr. 50. Případnou příčinou může být nepřesnost měření. Řešením by mohlo být zkusit tuto variantu vstříknout znovu a provést opětovné vyhodnocení smrštění. Pokud by se tento předpoklad vyvrátil, bylo by nutné hledat další příčinu tohoto jevu. Z hlediska výrobního smrštění materiálů PLA a PLLA a jeho přínosů pro teorii, lze konstatovat, že teoretické předpoklady byly takřka plně potvrzeny.

6.1.2. TAGUCHIHO METODA

Dalším zpracováním vyhodnocených dat výrobního smrštění bylo užití Taguchiho metody pomocí S/N stupně. Optimální stupeň experimentu je ten, který vykazuje nejvyšší hodnotu S/N stupně (nižší hodnota smrštění). Z hlediska porovnání průběhů vyhodnocených křivek S/N stupně s teorií lze konstatovat pro materiál PLA, že průběh teploty taveniny v závislosti na S/N stupni (obr. 32) koresponduje s teorií na obr. 20. Porovnání vlivu vstřikovacího parametru dotlaku mezi vyhodnoceným S/N stupněm na obr. 32 a teorií na obr. 19 také souhlasí. Porovnání vlivu vstřikovací rychlosti mezi teorií na obr. 18 a vyhodnocením S/N stupně na obr. 32 je, že dle teorie je vliv vstřikovací rychlosti nejednoznačný, to však nevyplývá z vyhodnocení S/N stupně u materiálu PLA, ze kterého vyplývá, že se stoupající rychlostí klesá hodnota smrštění. Přesto lze tento výsledek považovat za odpovídající teorii, která je nejednoznačná a zároveň křivka není příliš strmá. Posledním porovnávaným vstřikovacím parametrem je vliv tloušťky materiálu. Teorie udává, že s rostoucí tloušťkou roste smrštění, ale u vyhodnocení S/N stupně pro tloušťku je tento trend opačný.

Z výsledků metody S/N stupně u materiálu PLLA lze konstatovat, že průběh teploty taveniny v závislosti na S/N (obr. 33) stupni koresponduje s teorií na obr. 20. Porovnání vlivu vstřikovacího parametru dotlaku mezi teorií na obr. 19 a vyhodnocením S/N stupně na obr. 33 také souhlasí. Porovnání vlivu vstřikovací rychlosti mezi teorií na obr. 18 a vyhodnocením S/N stupně na obr. 33 je, že dle teorie je vliv vstřikovací rychlosti nejednoznačný, to však nevyplývá z vyhodnocení S/N stupně u materiálu PLA, ze kterého vyplývá, že se stoupající rychlostí klesá hodnota smrštění. Přesto lze tento výsledek považovat za odpovídající teorii, která je nejednoznačná a zároveň křivka není příliš strmá. Posledním porovnávaným vstřikovacím parametrem je vliv tloušťky materiálu a u vyhodnocení S/N stupně pro tloušťku je tento trend stejný jako u teorie.

Shrnutím uvedených porovnáání pro oba materiály PLA a PLLA lze konstatovat, že přínosem pro teorii je její téměř úplné potvrzení. Jenom v případě materiálu PLA a vlivu tloušťky materiálu na smrštění dle S/N stupně je trend opačný.

6.1.3. PRŮBĚH TLAKU VE FORMĚ

U porovnáání mezi variantami je předpokládáno dle teorie, že vliv rychlosti vstřikování je nejednoznačný, proto byly varianty porovnány při stejných dotlacích nebo teplotě taveniny. Při stejných dotlacích se sledoval vliv teploty taveniny na rozdíl maximálních hodnot tlaku ve vstřikovacím procesu a výrobního smrštění mezi variantami. Při stejné teplotě taveniny se sledoval vliv dotlaku na rozdíl maximálních hodnot tlaku ve vstřikovacím procesu a výrobního smrštění mezi variantami. Z těchto vyhodnocení nelze určit jednoznačné souvislosti způsobené kombinací vlivů hodnota teploty taveniny a dotlaku. Proto je vhodnější sledovat tyto vlivy pomocí S/N stupně.

S teoretickými předpoklady lze porovnat průběh tlaku ve formě ve smyslu poklesu tlaku v závislosti na vzdálenosti od vtoku. To potvrdil experiment a např. na obr. 35 je tento jev jednoznačně zobrazen. Na obrázku je názorně vidět snižující se tlak v jednotlivých bodech měření B1-B3 se zvětšující se vzdáleností od vtoku. A to nejenom u maximálních hodnot tlaku, ale i v závislosti na časové ose. To znamená, že v bodě B3 tlak klesl na minimální hodnotu již v čase 12 s, v bodě B2 až v čase 16 s a v bodě B1 v čase 20 s. To potvrzuje teorii, že vlivem tření při vstřikovacím procesu by měl tlak klesat s větší vzdáleností od vtoku. Ale tato teorie fungovala jen pro tloušťky 2 mm u materiálu PLA a PLLA. U tloušťky 4 mm to není již tak jednoznačné. Tím je to i přínosem pro teorii z hlediska zkoumaných materiálů PLA a PLLA.

6.2. DISKUZE VÝSLEDKŮ Z HLEDISKA PRAKTICKÝCH POZNATKŮ

6.3. TAGUCHIHO METODA

Pomocí Taguchiho metody byly vyhodnoceny nejlepší parametry pro vstřikovací proces. Pro PLA to byla varianta 12 a pro PLLA varianta 3. Nastavení variant je zobrazeno na obr. 50, kde je i celkové zhodnocení. Na tomto obrázku je vidět nastavení příslušné varianty pro příslušný materiál. V příslušných sloupcích je vidět minimální smrštění v jednom ze tří měřicích bodů. V tomto případě je to rozděleno pro jednotlivé tloušťky, v dalším sloupci je maximální smrštění v příslušném bodě a minimální průměrné smrštění, které již vychází z obou tlouštěk. To koresponduje vždy i s výsledkem z Taguchiho metody

určením S/N stupně. Dle teoretických předpokladů by se dalo očekávat, že čím nižší teplota tím nižší smrštění, čím vyšší dotlak tím také nižší smrštění a rychlost je většinou uváděna jako ne moc významný parametr ovlivňující smrštění. Z hlediska tloušťky výstřiku by se mohlo předpokládat narůstající smrštění s tloušťkou stěny. Jen je otázkou jak významně ovlivňuje tento parametr smrštění vůči ostatním parametrům. Pokud bude dávat větší významnost hodnotě dotlaku a teploty. To znamená, že nejmenší smrštění bude při 100 % dotlaku a nejnižší teplotě. To bylo pro PLA 175 °C a pro PLLA 185 °C. To koresponduje i s výsledky. Ale jak je vidět na výsledcích jednoznačnost vlivu tloušťky se nemůže z této analýzy potvrdit, jelikož je to jednou pro tloušťku 4 mm u PLA (není dle teorie) a jednou pro 2 mm u PLLA (zdá se v pořádku). Ještě je zapotřebí zvážit možné ovlivnění právě varianty 14 u PLLA, kde v bodě měření B3 došlo naopak ke snížení smrštění. To lze obratem vyvrátit, jelikož při jednoduchém testu, kdy byla hodnota smrštění pro variantu 14 u PLLA v bodě B3 změněna na hodnotu většího smrštění než v měřicích bodech B1 a B2, tak nedošlo k zásadní odlišnosti od předchozího výsledku v podobě varianty 3. Spíše by chtělo věnovat pozornost materiálu PLA, kde by se dalo předpokládat, že to bude také varianta s menší tloušťkou stěny. Hlavním výstupem pro praxi je vhodné nastavení vstřikovacích parametrů. Optimální nastavení parametrů pro materiál PLA je kombinace - teplota taveniny 175 °C, dotlak 100 %, vstřikovací rychlost 75 cm³/s a tloušťka výstřiku 4 mm. Optimální nastavení parametrů pro materiál PLLA je kombinace - teplota taveniny 185 °C, dotlak 100 %, vstřikovací rychlost 75 cm³/s a tloušťka výstřiku 2 mm.

6.3.1. PRŮBĚH TLAKU VE FORMĚ

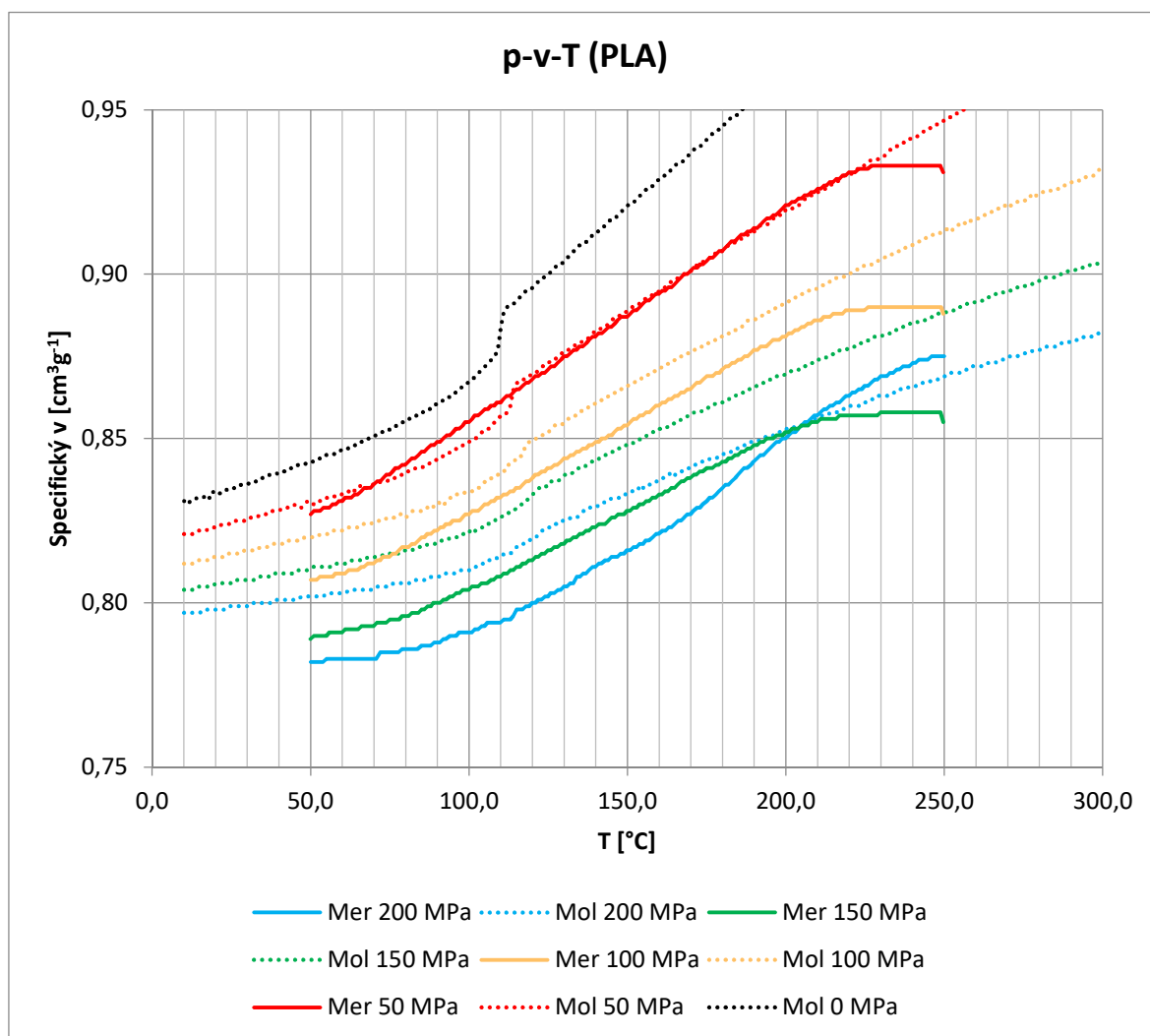
Z hlediska vstřikovacích tlaků byly analyzovány jejich průběhy. To znamená, zda se jedná o předčasné nebo pozdní přepnutí na dotlak a nebo o optimální průběh. V tabulce je to značeno *Pr* – předčasné přepnutí, *Po* – pozdní přepnutí a *OK* – optimální průběh. U materiálu PLA 2 mm jsou první dvě varianty označeny jako předčasné přepnutí. Pokud je na to hleděno z teoretického pohledu, tak u těchto variant je nízká vstřikovací rychlost, proto lze předpokládat nižší tlak a v souvislosti s nízkou teplotou vstřikování, která také snižuje vstřikovací tlak, lze předpokládat po přepnutí na dotlak vznik průběhu odpovídajícího předčasnému přepnutí. U variant 3, 5, 7, 9 došlo dle průběhu k pozdnímu přepnutí na dotlak. To lze vysvětlit tím, že u těchto variant jsou vysoké vstřikovací rychlosti a v některých případech v kombinaci s vysokou teplotou to způsobilo prudký nárůst tlaku, než došlo k přepnutí na dotlak. U zbylých variant, které lze pokládat za optimální, je takový

kompromis mezi střední teplotou a střední až nižší vstřikovací rychlostí. Lze usoudit, že zde nevzniklo nic neočekávaného, ale tomu tak není u dalších variant pro PLA 4 mm ani pro všechny varianty PLLA. Zde již není taková jednoznačnost z hlediska rychlostí a teploty. U některých variant to souhlasí, ale spíše převládají varianty, kde musí být další významný vliv např. tloušťka stěny. V tomto případě by asi chtělo provést nějakou hlubší analýzu nebo provést další testy vstřikovacího procesu. Celkovým shrnutím lze usoudit, že nejlepší variantou pro materiál PLA by se mohla dle výsledku považovat varianta 12, přestože z hlediska průběhu tlaku je tam velice mírný náznak předčasného přepnutí na dotlak. Pro materiál PLLA by se mohla zvolit jako nejvhodnější varianta 3, přestože zde dochází k mírnému náznaku, oproti ostatním variantám, pozdního přepnutí. To lze považovat za přínos pro praxi, aby se při využití těchto materiálů předešlo vzniku předčasného nebo pozdního přepnutí na dotlak a s tím spojenými problémy z hlediska kvality výstřiku.

6.3.2. SIMULACE

Aby bylo možné ověřit při vývoji tvaru dutiny formy nový výrobek z tohoto materiálu a aniž by se muselo vyrábět několik prototypových forem, mohou být provedeny simulace vstřikovacího procesu. Proto i v této práci byly provedeny simulace a sledovány odlišnosti oproti experimentu, aby byla představa s jakou přesností, lze získat obdobné výsledky jako při měření. V první fázi byly se simulací porovnávány průběhy tlaků. To bylo popsáno v kapitole 5.10.1. V oblasti vstřikovací fáze byly průběhy tlaku ve většině případů téměř shodné, ale v dotlakové fázi se začaly projevovat rozdíly, i když parametry pro simulaci byly nastaveny shodně se vstřikovacími parametry experimentu. Pokud je porovnání zaměřeno na maximální dosažený tlak, vyplývá z grafů, že pro materiál PLA a variantu 4, 6, 8, 9 se dají výsledky považovat za velmi shodné a u PLLA se dají považovat za dobré výsledky varianty 11, 12, 13, 14 a 16. Avšak u ostatních variant dochází ke vzniku především vyšších špiček s rozdílem až v řádech 100 bar. Další nesrovnalostí u všech grafů je, že tlak od dotlakové fáze výrazněji klesá než v průbězích z měření. Jednou z hlavních příčin může být kvalita modelu materiálu. To znamená, že testovaný materiál PLA nemusel mít úplně stejné vlastnosti, jako byl vybraný materiál z knihovny softwaru Moldex3D. To lze jednoduše dokázat např. porovnáním křivek p-v-T diagramu na obr. 51, kde jsou tečkovaně zobrazeny pro hodnoty p-v-T diagramu z databáze softwaru Moldex3D a plnými čarami jsou naměřené křivky z použitého materiálu pro vstřikování. Proto byla vyzkoušena i simulace s tímto nastavením p-v-T diagramu, ale zas tak zásadní vliv to nemělo oproti např.

nastavení indexu toku taveniny, který by měl být v rozsahu 70-80 g/10 min při teplotě 210 °C a hmotnosti 2,16 kg. Tam již byly výsledky znatelně rozdílné. V základním nastavení modelu materiálu byla nastavena hodnota 70. Pokud tato hodnota byla změněna na hodnotu 85, tak se pokles tlaku od dotlakové fáze klesal pomaleji a tím se to zase přiblížilo více hodnotám z experimentu, ale naopak zase byla menší hodnota maximálního tlaku v příslušných polohách senzorů. Dále bylo snahou do simulace zahrnout i odvodušnění formy, ale docházelo při plnění ke vzniku chyby při výpočtu a tím nebylo možné ověřit vliv na výsledky ze simulace. Zatím nebylo zjištěno, jakou příčinou k chybě docházelo. Dalším testem bylo zvýšení teploty formy a teploty chladicího okruhu, tím by se měl zase ovlivnit sklon poklesu tlaku, ale tím již byla simulace nastavena odlišně oproti reálnému vstřikování a navíc to nemělo zásadní vliv.



Obr. 51 Porovnání p-v-T grafů mezi modelem materiálu v softwaru Moldex3D a naměřenými daty

Další omezení při simulaci nastala tím, že plnicí fáze je zastavena v softwaru při 100 % vyplnění výstřiku, ale z hlediska porovnání s měřením to byl problém. Protože při vstřikování na stroji bylo nastaveno přepnutí na dotlak dle objemu. Zjednodušeně řečeno v závislosti na poloze čela šneku. Jelikož bylo potřeba otestovat různé varianty, tak docházelo k tomu, že výstřik byl již naplněn a tlak dále stoupal, vlivem vtlačení dalšího materiálu do dutiny formy, dokud stroj nepřepnul dle objemu na dotlak. Tento stav však není možné v softwaru nasimulovat, jelikož jak bylo zmíněno, při stoprocentním naplnění výstřiku se ukončí vstřikovací fáze, aniž by poloha šneku byla již v poloze pro přepnutí na dotlak. Tím automaticky simulace pokračovala dotlakovou fází. Takže se základním nastavením s modelem materiálu z databáze docházelo k předčasnému zamrznutí vtoku a tím v dalších úsecích průběhu tlaku nemohlo docházet ke shodě s naměřenými daty. Další zvažovanou příčinou nesrovnalosti byla velikost sítě. Proto byla vyzkoušena síť s různými velikostmi. Z hlediska průběhu to nemělo zásadní vliv, ale s ohledem na vyhodnocované smrštění to vliv mělo. Při vyhodnocování smrštění dokonce docházelo k opačnému trendu. To znamená, že naopak největší smrštění bylo uprostřed výstřiku. Vysvětlením může být stejný důvod jako u průběhu tlaku při dotlaku, kdy došlo při simulaci k dřívějšímu zamrznutí vtoku než při datech z měření. To způsobilo, že již pomocí dotlaku nebyl do těchto míst přesunut další materiál, aby zde naopak bylo menší smrštění a tím došlo k opačnému efektu při simulaci. Je nutné také zmínit, že rozdíly smrštění v jednotlivých bodech se liší v řádech desetin až setin procenta, tak je diskutabilní, zda to je relevantní parametr kvality simulace. Celkovým shrnutím by se dalo konstatovat, že by bylo potřeba především upřesnit model materiálu a potom provést simulace znovu a sledovat, zda došlo ke zlepšení výsledků v porovnání s měřením. Možná je také dobré se zamyslet nad přesností měření, že i tam se mohou vyskytnout chyby nebo obecně zvážit základní přesnost snímačů. To z toho důvodu, aby nalezené nesrovnalosti nebyly přiřazovány jen simulaci. Také je možné vzít do úvahy obecnou přesnost numerických metod užitých v těchto simulacích. Lze tedy konstatovat z této simulace, že přínos pro praxi a tyto materiály není jednoznačný. Konkrétnější závěry by bylo vhodné formulovat až po dalších simulacích, aby kvalita použitého softwaru nebyla neopodstatněně snižována.

6.4. DALŠÍ VÝZKUM

Z této diskuze tedy vyplývají různé poznatky a přínosy, které se dají využít pro teorii a v praxi, ale je řada směrů, které by chtělo prozkoumat a ověřit hlouběji, aby je bylo možné lépe aplikovat v praxi.

Jako další postup výzkumu by bylo vhodné ověřit variantu 14 pro PLLA s parametry vstřikování zobrazených na obr. 50, kde došlo k anomálii výsledku z hlediska smrštění. Dále prohloubit vyhodnocení S/N pro tloušťku a materiál PLA, kde byl opačný trend závislosti smrštění na tloušťce. Lze jen spekulovat nad tím, čím je to způsobeno, a zda by tento trend pokračoval i pro vyšší hodnoty tloušťky výstřiku. Nejjednodušším řešením by bylo provést experiment i pro větší tloušťku výstřiku a data vyhodnotit. To však aktuální konstrukce vstřikovací formy neumožňuje. Proto by dalším postupem mohlo být i rozšíření konstrukce formy s ohledem na její patentovou ochranu.

ZÁVĚR

Vývoj nových materiálů pro vstřikování je velice důležitým článkem k dosažení jejich vhodné recyklace a tím snížení vlivu na životní prostředí. Tento předpoklad je stále více skloňován s ohledem na globální procesy a je a bude snahou vyvíjet materiály, co nejšetrnější k životnímu prostředí, aby byly biologicky rozložitelné. Nedílnou součástí vývoje nových materiálů je získání jejich vlastností v podobě experimentů, určení jejich vhodnosti pro různé aplikace a popsání postupu jejich zpracování s ohledem na návrh tvaru výstřiku.

Proto se tato práce zabývala analýzou lokálního smrštění biodegradibilních materiálů PLA a PLLA. V první části práce byly stanoveny cíle a současný stav výzkumu v řešené problematice. Následovaly kapitoly rešeršního typu obsahující teoretické poznatky z oblasti biopolymerů, technologie vstřikování a smrštění výstřiku.

Hlavním obsahem práce je experimentální část, kde byly stanoveny vstřikovací parametry, popsána patentovaná vstřikovací forma a vstřikovací stroj. Pro měření byl použit měřicí systém Kistler a dle Taguchiho metody byly určeny vstřikované varianty v rozsahu 18 variant pro PLA a 18 variant pro PLLA. Dle nastavení pro tyto varianty byly vyrobeny výstřiky v minimálním množství 5 kusů pro každou variantu. Následovala 24 hodinová relaxace výstřiků a potom proběhlo měření jejich tloušťky ve třech bodech. Z výsledků bylo vyhodnoceno smrštění a pomocí Taguchiho stupně experimentu určena nejvhodnější varianta z hlediska smrštění. Z výsledků vyplývá, že se jedná o PLA 4 mm varianta 12. Shodou okolností se vyhodnocené parametry touto metodou právě shodovaly s jednou z variant. Ale obecně se vyhodnocené parametry nemusí shodovat s definovanými variantami. U materiálu PLLA je nejlepší nastavení vstřikovacích parametrů odpovídající variantě 3.

Součástí experimentu bylo i měření průběhu tlaku ve formě v průběhu vstřikovacího cyklu. Tato data byla analyzována z hlediska průběhu tlakové křivky. Zaměření analýzy bylo na sledování, zda se nejedná o předčasné nebo pozdní přepnutí na dotlak. Pokud se nejednalo ani o jeden ze zmíněného stavu, byl průběh považován za vhodný pro vstřikování, aniž by např. docházelo k propadům nebo nadměrnému namáhání formy. Pro materiál PLA se jednalo o varianty 4, 6, 8, 14, 15, 16, 17 a 18. U materiálu PLLA se jednalo o varianty 6, 9, 10, 11, 15 a 17. Bohužel se ani jedna z variant neshodovala s nejlepší variantou

vyhodnocenou dle nejnižšího smrštění. Proto při volbě ideálních parametrů muselo dojít ke kompromisu a to dle diskuze volbou varianty 12 pro PLA a varianty 3 pro PLLA.

Další částí bylo vyhodnocení p-v-T digramu, kde bylo předpokládáno jeho využití v simulaci vstřikovacího procesu. Jelikož následně bylo zjištěno, že je pro model materiálu určeného pro simulaci důležitá řada dalších parametrů, které není jednoduché získat, byly tyto grafy užity pro diskuzi nad výsledky.

Jak již bylo zmíněno, byla připravena simulace vstřikovacího procesu pro 18 variant materiálu PLA. Pro materiál PLLA to nebylo možné, jelikož model materiálu nebyl k dispozici užitého softwaru Moldex3D. Simulací bylo snahou ověřit stejné chování jako z naměřených dat tlaku a vyhodnoceného smrštění. Z výsledků průběhu tlaku vyplynulo, že řada variant se blíží naměřeným datům, ale největší odchylka byla v oblastech dotlaku, kde tlak klesal velice prudce ve srovnání s měřením. Z diskuze vyplývá, že může být příčinou nepřesný model materiálu, předčasné zamrznutí vtoku, odlišnosti v rozměrech dutiny formy, nezahrnutí odvzdušňovacích otvorů formy nebo také omezení softwaru Moldex3D. Z hlediska výsledků smrštění se hodnoty smrštění pohybují v rozsahu smrštění vyhodnocených z měření, ale především je zářezový jejich trend s největším smrštěním uprostřed výstřiku. Dle diskuze to může být zapříčiněno předčasným zamrznutím vtoku, volbou velikosti sítě nebo dobou měření a vyhodnocení smrštění po 24 hodinách vůči vyhodnocení v simulaci po vyhození výstřiku z dutiny formy. Také je nutné zmínit, že zásadní roli může hrát obecně matematická přesnost užitých numerických metod v simulaci. Obecně lze říci k výsledkům, že v řadě variant to lze považovat za dobré výsledky a naopak v ostatních případech se měření a simulace značně rozcházejí. I tyto výsledky této práce byly publikovány např. v článcích [57], [58] a [59].

Celkovým shrnutím lze konstatovat, že tato práce přinesla nové poznatky z hlediska zpracování těchto vybraných biologicky rozložitelných plastů. Především se jedná o poznatky, které pomohou konstruktérům a technologům při volbě vhodných parametrů z hlediska smrštění a kvality výstřiku. Samozřejmě jsou zde i oblasti, které by bylo vhodné dále zkoumat a rozšiřovat jako například získání přesnějších parametrů pro materiálový model a přiblížit se více naměřeným datům, aby konstruktéři forem mohli jednoduše navržený tvar výstřiku ověřit jen pomocí simulace s určitou přesností. Dalšími budoucími kroky by mohlo být stanovení grafů určujících smrštění výstřiku v závislosti jen na jednom konkrétním parametru.

SOUPIS POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Easycnc. Easycnc [online]. [cit. 2018-04-1]. Dostupné z: <https://www.easycnc.cz/inpage/pla/>
- [2] CHIEH-LI, Chen a Chen CHIEH-LI. Study on Shrinkage of Injection Molding Biodegradable materials. *Materials Science Forum*. 2016, 505-507, 199-204. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.505-507.199>.
- [3] JAMSHIDIAN, Majid, Elmira TEHRANY, Muhammad IMRAN, Muriel JACQUOT, Stephane DESOBRY a Majid JAMSHIDIAN. Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety* [online]. 2010, 9(5), 552-571 [cit. 2018-10-31]. DOI: 10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x. ISSN 1541-4337. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/877594728/>
- [4] OLIAEI, Erfan, Behzad Shiroud HEIDARI, Seyed Mohammad DAVACHI, Mozghan BAHRAMI, Saeed DAVOODI, Iman HEJAZI a Javad SEYFI. Warpage and Shrinkage Optimization of Injection-Molded Plastic Spoon Parts for Biodegradable Polymers Using Taguchi, ANOVA and Artificial Neural Network Methods. *Journal of Materials Science & Technology* [online]. Elsevier, 2016, 32(8), 710-720 [cit. 2018-10-31]. DOI: 10.1016/j.jmst.2016.05.010. ISSN 1005-0302.
- [5] YANG. Three-Dimensional Simulation of the Shrinkage Behavior of Injection-Molded Poly Lactic Acid (PLA): Effects of Temperature, Shear Rate and Part Thickness. *Journal of Research Updates in Polymer Science* [online]. 2013 [cit. 2018-11-22]. DOI: 10.6000/1929-5995.2013.02.03.4. ISSN 19295995. Dostupné z: <http://www.lifescienceglobal.com/journals/journal-of-research-updates-in-polymer-science/volume-2-number-3?id=322>
- [6] HEIDARI, Behzad Shiroud, Erfan OLIAEI, Hadi SHAYESTEH, Seyed Mohammad DAVACHI, Iman HEJAZI, Javad SEYFI, Mozghan BAHRAMI a Hamid RASHEDI. Simulation of mechanical behavior and optimization of simulated injection molding process for PLA based antibacterial composite and nanocomposite bone screws using central composite design. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* [online]. 2017, **65**, 160-176 [cit. 2018-11-22]. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2016.08.008. ISSN 17516161. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S175161611630265X>
- [7] DOUPNÍK, Petr. Využití optimalizačních metod při návrhu transsonického křídla s implementací základních konstrukčně pevnostních omezení [online]. [cit. 2018-11-02]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=24476
- [8] WANG, Shu Wen a Te Li SU. Application of Taguchi Method in the Optimization of Processing Parameters for Green Fiber. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2013, **239-240**(1), 1596-1599 [cit. 2018-11-25]. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.239-240.1596>. Dostupné z: <https://www.scientific.net/AMM.239-240.1596>
- [9] SOLARSKI, Samuel, Manuela FERREIRA a Eric DEVAUX. Thermal and mechanical characteristics of polylactide filaments drawn at different temperatures. *Journal of the Textile Institute* [online]. 2007, **98**(3), 227-236 [cit. 2018-11-22]. DOI:

- 10.1080/00405000701476179. ISSN 0040-5000. Dostupné z: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00405000701476179>
- [10] MAHARANA, Tungabidya, Sasmita PATTANAIK, Anita ROUTARAY, Nibedita NATH a Alekha Kumar SUTAR. Synthesis and characterization of poly(lactic acid) based graft copolymers. *Reactive and Functional Polymers* [online]. 2015, **93**, 47-67 [cit. 2018-11-22]. DOI: 10.1016/j.reactfunctpolym.2015.05.006. ISSN 13815148. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1381514815000711>
- [11] RADJABIAN, M., M. H. KISH a N. MOHAMMADI. Structure–property relationship for poly(lactic acid) (PLA) filaments: physical, thermomechanical and shape memory characterization. *Journal of Polymer Research* [online]. 2012, **19**(6) [cit. 2018-11-22]. DOI: 10.1007/s10965-012-9870-0. ISSN 1022-9760. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10965-012-9870-0>
- [12] 3D-tisk.cz. 3D-tisk.cz [online]. [cit. 2018-04-1]. Dostupné z: <https://www.3d-tisk.cz/pla/>
- [13] DUCHÁČEK, Vratislav. Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006, 278 s. ISBN 80-7080-617-6.
- [14] MACHEK, Václav a Jaromír SODOMKA. Nauka o materiálu. Vyd. 1. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2008, 86 s. ISBN 978-80-01-03927-4.
- [15] KROISOVÁ, Dora. Biodegradovatelné polymery - úvod do problematiky. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009, 78 s. ISBN 978-80-7372-468-9.
- [16] ROSATO, Dominick V, Donald V ROSATO, Marlene G ROSATO a Donald V ROSATO. 2000. Injection molding handbook [online]. 3rd ed. / Boston: Kluwer Academic Publishers, xxxi, 1457 p. [cit. 2015-05-04]. ISBN 07-923-8619-1. Dostupné z: http://books.google.cz/books/about/Injection_Molding_Handbook.html?id=l5jqDRauKNYC.
- [17] Production of polylactic acid (pla) from renewable feedstocks. PCT/IN2005/000161. Uděleno 27. srpen 2008. Zapsáno 20. květen 2004.
- [18] MOHANTY, Amar K, Manjusri MISRA a Lawrence T DRZAL. Natural fibers, biopolymers, and biocomposites. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2005, 875 p. ISBN 084931741x.
- [19] AURAS, Rafael. 2010. Poly(lactic acid): synthesis, structures, properties, processing, and applications/ edited by Rafael Auras .[et al.] [online]. Hoboken, N.J.: Wiley, xxiii, 499 p. [cit. 2015-05-04]. ISBN 978-047-0293-669. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=UBUdo_mbr6AC
- [20] NatureWorks: Biopolymer 3251D. NatureWorks LLC, 2008.
- [21] NISHA, S. Kumari a S. K. ASHA. Chiral poly(l-lactic acid) driven helical self-assembly of oligo(p-phenylenevinylene). *Journal of Materials Chemistry C* [online]. 2014, **2**(11), 2051- [cit. 2018-04-22]. DOI: 10.1039/c3tc32241f. ISSN 2050-7526. Dostupné z: <http://xlink.rsc.org/?DOI=c3tc32241f>
- [22] Synterra: PLLA 1010. 2011-12

- [23] GUPTA, Rakesh K. Polymer and composite rheology. 2nd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, 2000. Plastics engineering (Marcel Dekker, Inc.), 58. ISBN isbn:0-8247-9922-4.
- [24] LENFELD, P. Plastics Processing. 1. vyd. Liberec: TU v Liberci, 2007, 217 s. ISBN 978-80-7372-282-1
- [25] Rutland Plastics Limited: Images [online]. 2013 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: <http://www.rutlandplastics.co.uk/images/Moulding%20Machine%20lg.jpg>
- [26] WEINLICH, Petr. Rozměrové změny matric PP s nanoplínivem. Liberec, 2008. Disertační práce. TU v Liberci.
- [27] STOKLASA, Karel. Zpracovatelské inženýrství I: Základy plastikářské a gumárenské technologie. Zlín: UTB, 2007.
- [28] Prokopová Irena: *Makromolekulární chemie*. 2nd ed. Praha : VŠCHT Praha, 2007. P. 035. ISBN 978-80-7080-662-3
- [29] STOKLASA, Karel. Makromolekulární chemie. Zlín: UTB.
- [30] LENFELD, Petr. Technologie II [online]. [cit. 2017-08-06]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01.htm
- [31] BĚHÁLEK, Luboš. Hodnocení makromolekulární struktury plastů [online]. [cit. 2018-02-1]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/Intech/Morfologie.pdf>
- [32] LENFELD, Petr. Technologie plastů [online]. [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/184/03.html>
- [33] KOLOUCH, J.: Strojírenské výrobky z plastů vyráběné vstřikováním. SNTL, Praha, 1986.
- [34] LENFELD, P.: Technologie vstřikování. Liberec, 2014. ISBN: 978-80-88058-74-8
- [35] Rutland Plastics Limited: Images [online]. 2013 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: <http://www.rutlandplastics.co.uk/images/Moulding%20Machine%20lg.jpg>
- [36] ZEMAN, Lubomír. Vstřikování plastů. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2009, 246 s. ISBN 978-80-7300-250-3.
- [37] FÁZOVÉ PŘECHODY V PEVNÝCH LÁTKÁCH. In: *Docplayer* [online]. Vlach M., 2018 [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/7983020-Vlach-m-fazove-prechody-v-pevnych-latkach.html>
- [38] FISCHER, Jerry M. Handbook of molded part shrinkage and warpage. Norwich, NY: Plastics Design Library/William Andrew Pub., c2003. ISBN 1-884207-72-3.
- [39] LENFELD, Petr. Vstřikovací formy pro zpracování termoplastů [online]. [cit. 2017-01-12]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/179/09.html>
- [40] AUSPERGER, Aleš. Tvářené díly z kovů a plastů (tváření kovů a plastů): Konstrukce vstřikovacích forem, aplikace plastových dílů v automobilovém průmyslu. [online]. [cit. 2018-01-22]
- [41] BOBČÍK, Ladislav. Formy pro zpracování plastů: vstřikování termoplastů. Díl 1. 2. upr. vyd. Brno : Uniplast, 1999. 133s.

- [42] DANĚK, Josef. Porovnání predikce tlaku a teploty pomocí Moldflow analýzy s naměřenými hodnotami ve formě. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2017, 98 s. (85 747 znaků bez mezer). Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/40742>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Ovsík, Martin.
- [43] Plastic portal [online]. [cit. 2017-08-06]. Dostupné z: <http://www.plasticportal.cz/cs/digitalni-prototyp-autodesk-simulation-moldflow-od-smartplast-s-r-o/c/1181>
- [44] Cad studio [online]. [cit. 2017-08-06]. Dostupné z: www.cadstudio.cz
- [45] Simulplast [online]. [cit. 2018-03-22]. Dostupné z: <http://www.simulplast.cz/molindex3d.php>
- [46] Preview of Plastpol in Kielce. In: *Arburg* [online]. Arburg: Arburg, 2018 [cit. 2018-10-31]. Dostupné z: https://www.arburg.com/fileadmin/redaktion/bilder/presse_300dpi/arburg_18551-01-470c_golden_edition.jpg
- [47] Rutland Plastics Limited: Images [online]. 2013 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: <http://www.rutlandplastics.co.uk/plastics-moulding-methods/moulding-machine> THOMASNET: Injection Molding Tool enables zero defect production. [online]. 2006 [cit. 2015-10-23]. Dostupné z: <http://news.thomasnet.com/fullstory/injection-molding-tool-enables-zero-defect-production-486763>
- [48] ROY, Ranjit K. Design of experiments using the Taguchi approach New York: Wiley, c2001, 545 p. ISBN 0471361011.
- [49] HUSSIN, Radhwan, Rozaimi MOHD SAAD a Razaidi HUSSIN. 2012. An Optimization of Plastic Injection Molding Parameters Using Taguchi Optimization Method. Asian Transactions on Engineering [online]. 2(5): 75 - 80 [cit. 2015-05-04]. ISSN 2221-4267. Dostupné z: http://www.academia.edu/2569159/An_Optimization_of_Plastic_Injection_Molding_Parameters_Using_Taguchi_Optimization_Method
- [50] KAMARUDDIN, S. Application of Taguchi Method in the Optimization of Injection Moulding Parameters for Manufacturing Products from Plastic Blend. IACSIT International Journal of Engineering and Technology, [online]. 2010, roč. 2, č. 6, s. 574-580 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.ijetch.org/papers/184-T565.pdf>
- [51] TEORIE ZPRACOVÁNÍ NEKOVOVÝCH MATERIÁLŮ [online]. Liberec [cit. 2017-08-16]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/10511306-Teorie-zpracovani-nekovovych-materialu.html>
- [52] Přístrojové vybavení [online]. [cit. 2016-01-12]. Dostupné z: http://www.utb.cz/photo_full/6769-jpeg
- [53] PVT Properties of Polymers for Injection Molding [online]. [cit. 2017-05-16]. Dostupné z: http://cdn.intechopen.com/pdfs/33643/InTech-Pvt_properties_of_polymers_for_injection_molding.pdf
- [54] ŠTĚPEK, Jiří, Antonín KUTA a Jiří ZELINGER. Technologie zpracování a vlastnosti plastů. Praha: SNTL, 1989, 637 s.

- [55] KUTA, Antonín. Technologie a zařízení pro zpracování kaučuků a plastů. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 1999. ISBN 978-80-7080-367-7
- [56] SOVA, Miloš. Nadmolekulární struktura polymerů (morfologie). In: *Tech Portal* [online]. Praha: Verlag Dashöfer, 2015, 2015 [cit. 2018-11-19]. Dostupné z: <https://www.techportal.cz/33/nadmolekularni-struktura-polymeru-morfologie-uniqueidmRRWSbk196FNf8-jVUh4EqQUkSFod1Gx3QrrmAHliVA/?query=Nadmolekul%20struktura%20polymer%20morfologie&serp=1>

Seznam publikací týkající se zaměření disertační práce.

- [57] JANOŠOVÁ, Monika a Petr LENFELD. A Locally Shrinkage of the Biopolymers PLA and PLLA [online]. 4(4): 555-560 [cit. 2015-10-23]. ISSN 2277 – 5668. Dostupné z: http://www.ijeir.org/administrator/components/com_jresearch/files/publications/IJEIR_1647_Final.pdf
- [58] JANOŠOVÁ, Monika a Petr LENFELD. Analysis of Parameters with Influence on Material Shrinkage PLA and PLLA. Materials Science Forum. 2016, (862), 133-140. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.862.133. ISSN 02555476.
- [59] JANOŠOVÁ, Monika a Petr LENFELD. Analysis of the Pressure and Shrinkage in the Mould for PLA and PLLA, Materials Science Forum, Vol. 919, pp. 128-135, 2018

SEZNAM PŘÍLOH

P1 – Materiálový list PLA

P2 – Materiálový list PLLA

P3 – Průběhy smrštění a tlaků u PLA a PLLA

P1 – Materiálový list PLA



NatureWorks® Biopolymer 3251D

Injection Molding Process Guide

NatureWorks® biopolymer 3251D is designed for injection molding applications. This polymer grade has a higher melt flow capability than other NatureWorks® resins currently in the market place. The higher flow capability allows for easier molding of thin-walled parts.

It is designed for injection molding applications where the requirements are clarity with heat deflection temperatures lower than 120°F (49°C).

Processing Temperature Profile		
Melt Temperature	390°F	200°C
Feed Throat	70°F	20°C
Feed Temperature	330°F	165°C
Compression Section	380°F	195°C
Metering Section	400°F	205°C
Nozzle	400°F	205°C
Mold	75°F	25°C
Screw Speed	100-175 rpm	
Back Pressure	50-100 psi	
Mold Shrinkage	.004 in/in. +/- .001	

Note: These are starting points and may need to be optimized.

Processing Information

3251D resin can be processed on conventional injection molding equipment. The material is stable in the molten state, provided that the drying procedures are followed. Mold flow is highly dependent on melt temperature. In order to control melt temperature, it is recommended to balance screw speed, back pressure, and process temperature. Injection speed should be medium to fast.

Process Details

Startup and Shutdown

NatureWorks® biopolymer 3251D is not compatible with a wide variety of other resins, and special purging sequences should be followed:

1. Clean extruder and bring temperatures to steady state with low-viscosity, general-purpose polystyrene or polypropylene.
2. Vacuum out hopper system to avoid contamination.
3. Introduce PLA polymer into the extruder at the operating conditions used in Step one.
4. Once PLA polymer has purged, reduce barrel temperatures to desired set points.
5. At shutdown, purge machine with high-viscosity polystyrene or polypropylene.

Table 1 – Typical Material & Application Properties ⁽¹⁾		
	PLA Resin (General Purpose)	ASTM Method
Physical Properties		
Specific Gravity	1.24	D792
Melt Index, g/10 min (210°C/2.16K)	70-85	D1238
Relative Viscosity	2.5	
Crystalline Melt Temperature (°C)	160-170	D3418
Glass Transition Temperature (°C)	55-65	D3417
Clarity	Transparent	
Mechanical Properties		
Tensile Yield Strength, psi (MPa)	7,000 (48)	D638
Tensile Elongation, %	2.5	D638
Notched Izod Impact, ft-lb/in (J/m)	0.3 (0.16)	D256
Flexural Strength (MPa)	12,000 (83)	D790
Flexural Modulus (MPa)	555,000 (3828)	D790

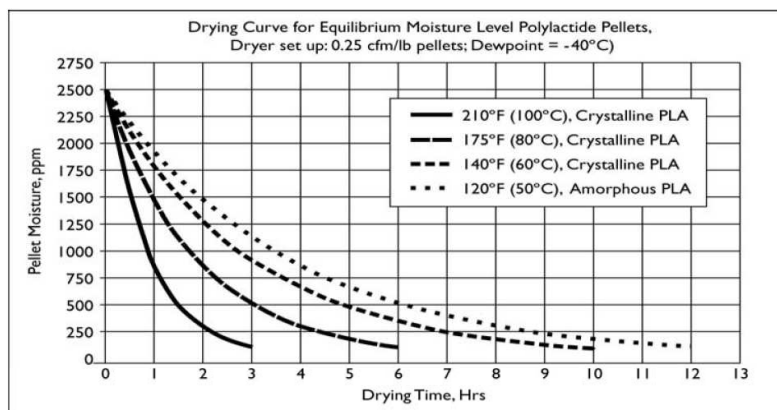
⁽¹⁾ Typical properties; not to be construed as specifications.

NatureWorks™ PLA Polymer 3251D

Drying

In-line drying is recommended for NatureWorks® resins. A moisture content of less than 0.010% (100 ppm) is recommended to prevent viscosity degradation. Polymer is supplied in foil-lined boxes or bags dried to <250 ppm. The resin should not be exposed to atmospheric conditions after drying. Keep the package sealed until ready to use and promptly dry and reseal any unused material. The drying curves for both amorphous and crystalline resins are shown to the right.

Note: Amorphous polymer must be dried below 120°F (50°C).

**Compostability**

Composting is a method of waste disposal that allows organic materials to be recycled into a product that can be used as a valuable soil amendment. NatureWorks® biopolymer 3251D is made primarily of polylactic acid, a repeating chain of lactic acid, which undergoes a 2-step degradation process. First, the moisture and heat in the compost pile attack the polymer chains and split them apart, creating smaller polymers, and finally, lactic acid. Microorganisms in compost and soil consume the smaller polymer fragments and lactic acid as nutrients. Since lactic acid is widely found in nature, a large number of organisms metabolize lactic acid. At a minimum, fungi and bacteria are involved in polymer degradation. The end result of the process is carbon dioxide, water and also humus, a soil nutrient. This degradation process is temperature and humidity dependent. Regulatory guidelines and standards for composting revolve around four basic criteria: Material Characteristics, Biodegradation, Disintegration, and Eco-toxicity. Description of the requirements of these testing can be found in the appropriate geographical area:

DIN V 54900-1 (Germany), EN 13432 (EU), ASTM D 6400 (USA), GreenPla (Japan). This grade of NatureWorks® PLA meets the requirements of these four standards with limitation of maximum layer thickness of 1650 µm and for coating layers up to 37 µm thick

FDA Status**U.S. Status-**

This is to advise you that on January 3, 2002 FCN 000178 submitted by NatureWorks LLC to FDA became effective. This effective notification is part of list currently maintained on FDA's website at <http://www.cfsan.fda.gov/~dms/opa-fcn.html>. This grade of NatureWorks® PLA may therefore be used in food packaging materials and, as such, is a permitted component of such materials pursuant to section 201(s) of the Federal, Drug, and Cosmetic Act, and Parts 182, 184, and 186 of the Food Additive Regulations. All additives and adjuncts contained in the referenced NatureWorks® PLA formulation meet the applicable sections of the Federal Food, Drug, and Cosmetic Act. The finished polymer is approved for all food types and B-H use conditions. We urge all of our customers to

perform GMP (Good Manufacturing Procedures) when constructing a package so that it is suitable for the end use. Again, for any application, should you need further clarification, please do not hesitate to contact NatureWorks LLC.

European Status

This grade of NatureWorks® Biopolymer complies with EU Plastics Directive 2002/72/EC, which applies to all EU member states. The Plastics Directive is a consolidated version of the "Monomers Directive (Commission Directive 90/128/EEC) and its first 7 amendments. This grade of NatureWorks® Biopolymer is also in compliance with "Bedarfgegenstände Gesetz", which is the German implementation of the EU Plastics Directive 2002/72/EC. Substances used in the manufacturing of this product which are not yet regulated by EU Plastics Directive 2002/72/EC, as amended, are in compliance with appropriate EU national regulations. NatureWorks LLC would like to draw your attention to the fact that the EU-Directive 2002/72/EC, which applies to all EU-Member States, includes a limit of 10 mg/dm² of the overall migration from finished plastic articles into food. In accor-

dance with EU-Directive 2002/72/EC the migration should be measured on finished articles placed into contact with the food-stuff or appropriate food simulates for a period and at a temperature which are chosen by reference to the contact conditions in actual use, according to the rules laid down in EU-Directives 93/8/EEC (amending 82/711/EEC) and 85/572/EEC Please note that it is the responsibility of both the manufacturers of finished food contact articles as well as the industrial food packers to make sure that these articles in their actual use are in compliance with the imposed specific and overall migration requirements. Again, for any application, should you need further clarification, please do not hesitate to contact NatureWorks LLC.

Safety and Handling Considerations

Material Safety Data (MSD) sheets for PLA polymers are available from NatureWorks LLC. MSD sheets are provided to help customers satisfy their own handling, safety, and disposal needs, and those that may be required by locally applicable health and safety regulations, such as OSHA (U.S.A.), MAK (Germany), or WHMIS (Canada). MSD sheets are updated regularly; therefore, please request and review the most current MSD sheets before handling or using any product.

The following comments apply only to PLA polymers; additives and processing aids used in fabrication and other materials used in finishing steps have their own safe-use profile and must be investigated separately.

Hazards and Handling Precautions

PLA polymers have a very low degree of toxicity and, under normal conditions of use, should pose no unusual problems from incidental ingestion, or eye and skin contact. However, caution is advised when handling, storing, using, or disposing of these resins, and good housekeeping and controlling of dusts are necessary for safe handling of product. Workers should be protected from the possibility of contact with molten resin during fabrication. Handling and fabrication of resins can result in the generation of vapors and dusts that may cause irritation to eyes and the upper respiratory tract. In dusty atmospheres, use an approved dust respirator. Pellets or beads may present a slipping hazard. Good general ventilation of the polymer processing area is recommended. At temperatures exceeding the polymer melt temperature (typically 170°C), polymer can release fumes, which may contain fragments of the polymer, creating a potential to irritate eyes and mucous membranes. Good general ventilation should be sufficient

for most conditions. Local exhaust ventilation is recommended for melt operations. Use safety glasses if there is a potential for exposure to particles which could cause mechanical injury to the eye. If vapor exposure causes eye discomfort, use a full-face respirator. No other precautions other than clean, body-covering clothing should be needed for handling PLA polymers. Use gloves with insulation for thermal protection when exposure to the melt is localized.

Combustibility

PLA polymers will burn. Clear to white smoke is produced when product burns. Toxic fumes are released under conditions of incomplete combustion. Do not permit dust to accumulate. Dust layers can be ignited by spontaneous combustion or other ignition sources. When suspended in air, dust can pose an explosion hazard. Firefighters should wear positive-pressure, self-contained breathing apparatuses and full protective equipment. Water or water fog is the preferred extinguishing medium. Foam, alcohol-resistant foam, carbon dioxide or dry chemicals may also be used. Soak thoroughly with water to cool and prevent re-ignition.

Disposal

DO NOT DUMP INTO ANY SEWERS, ON THE GROUND, OR INTO ANY BODY OF WATER. For unused or uncontaminated material, the preferred options include recycling into the process or sending to an industrial composting facility, if available; otherwise, send to an incinerator or other thermal destruction device. For used or contaminated material, the disposal options remain the same, although additional evaluation is required. (For example, in the U.S.A., see 40 CFR, Part 261, "Identification and Listing of Hazardous Waste.") All disposal methods must be in compliance with Federal, State/Provincial, and local laws and regulations.

NOTICE: No freedom from any patent owned by NatureWorks LLC or others is to be inferred. Because use conditions and applicable laws may differ from one location to another and may change with time, Customer is responsible for determining whether products and the information in this document are appropriate for Customer's use and for ensuring that Customer's workplace and disposal practices are in compliance with applicable laws and other governmental enactments. NatureWorks LLC assumes no obligation or liability for the information in this document. **NO WARRANTIES ARE GIVEN; ALL IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR USE ARE EXPRESSLY EXCLUDED.**

Environmental Concerns

Generally speaking, lost pellets are not a problem in the environment except under unusual circumstances when they enter the marine environment. They are benign in terms of their physical environmental impact, but if ingested by waterfowl or aquatic life, they may mechanically cause adverse effects. Spills should be minimized, and they should be cleaned up when they happen. Plastics should not be discarded into the ocean or any other body of water.

Product Stewardship

NatureWorks LLC has a fundamental duty to all those that make and use our products, and for the environment in which we live. This duty is the basis for our Product Stewardship philosophy, by which we assess the health and environmental information on our products and their intended use, then take appropriate steps to protect the environment and the health of our employees and the public.

Customer Notice

NatureWorks LLC encourages its customers and potential users of its products to review their applications for such products from the standpoint of human health and environmental quality. To help ensure our products are not used in ways for which they were not intended or tested, our personnel will assist customers in dealing with ecological and product safety considerations. Your sales representative can arrange the proper contacts. NatureWorks LLC literature, including Material Safety Data sheets, should be consulted prior to the use of the company's products. These are available from your NatureWorks LLC representative.

NOTICE REGARDING PROHIBITED USE

RESTRICTIONS: NatureWorks does not recommend any of its products, including samples, for use as: Components of, or packaging for, tobacco products; Components of products where the end product is intended for human or animal consumption; In any application that is intended for any internal contact with human body fluids or body tissues; As a critical component in any medical device that supports or sustains human life; In any product that is designed specifically for ingestion or internal use by pregnant women; and in any application designed specifically to promote or interfere with human reproduction.



For additional information in the U.S. and Canada, call toll-free 1-877-423-7659
In Europe, call 31-(0)35-699-1344
In Japan, call 81-33-285-0824



15305 Minnetonka Blvd., Minnetonka, MN 55345

NatureWorks and the NatureWorks logo are trademarks of NatureWorks LLC
Copyright © 2008 NatureWorks LLC

P2 – Materiálový list PLLA

 Synterra®	Synterra® PLLA 1010 Version: 2011-12	 Synbra Technology bv
--	---	---

Preliminary Datasheet for evaluating purposes : Compounding.

PHYSICAL PROPERTIES	TEST METHOD	UNITS	SPECIFICATION
Form			round pellets
Colour			Off white (crystallized)
Melt Flow Rate	ISO 1133 (190 °C ,2,16kg)	g/600s	12 (+- 2)
Polymer Density	ISO 1183	g/cm3	1.25
Moisture content			< 400 ppm
Residual Monomer		%	< 0,5
D-Isomer		%	< 1
Melting temperature	DSC: ISO 11357	°C	175-180
Glass Transition temperature	DSC: ISO 11357	°C	55-60


Processing

Temp. profile in the screw : 90-130-160-180-185-190-200-200 °C.

Screw speed : 175 rpm

Drying of the Synterra® PLLA 1010 is recommend prior to processing at a temperature of 60-80 °C for 4-6 hours using dehumidified air with a dew point of -40 °C.

C2C Certified and GMO free.

Synterra®, PLA made from Puralact® Lactide, was certified by MBDC EPEA on March 25th 2011 to meet the stringent requirements of Cradle to Cradle SILVERSM  product certification.

In addition to the use of inherent benign ingredients in the polymer recipe, the certification was only possible as the feedstock for Synterra® PLA is not originating from any Genetically Modified Organisms and is therefore a true GMO free product.

Cradle-to-Gate LCA Results for PLA¹

The cradle-to-gate impact of 1 kg PLA example.

	PLLA
Non-Renewable Energy Use	38,488 MJ
Renewable Energy Use	55,763 MJ
Resources	0,79198 kg Crude Oil-Equiv.
Carbon Footprint incl sequestration	0,9387 kg CO2-Equiv.
Acidification	0,026491 kg SO2-Equiv.
Photochemical Oxidant Formation	0,0025757 kg Ethene-Equiv.
Eutrophication	0,012416 kg Phosphate-Equiv.

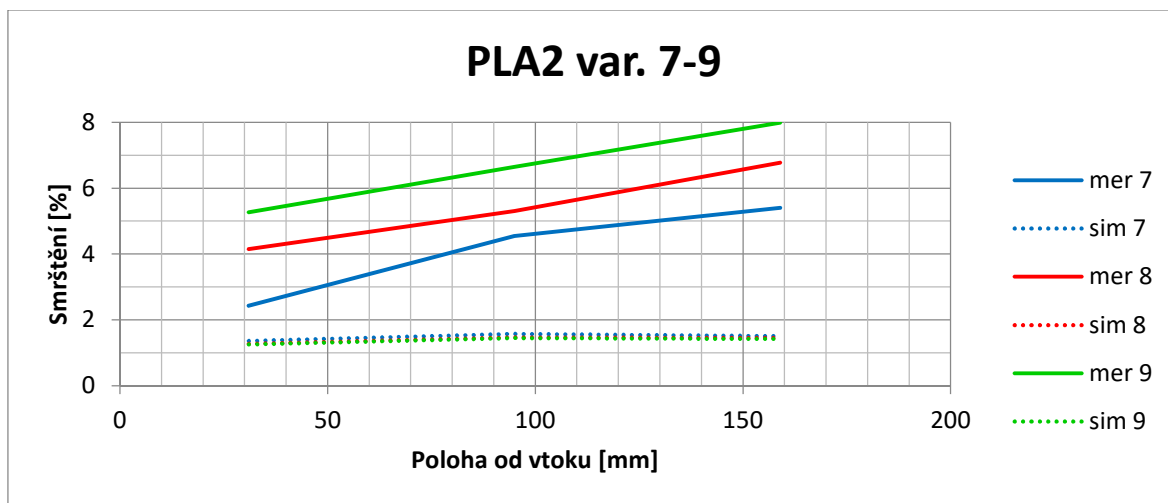
Note that the carbon footprint includes the biotic carbon dioxide sequestered during sugar cane farming (- 1833 kg CO2/tonne PLA).

¹ Based on Life Cycle Assessment Compliant with ISO 14 040 + 14 044 Standards
Prepared by Tobias Borén, AkzoNobel Sustainable Development, October 2010

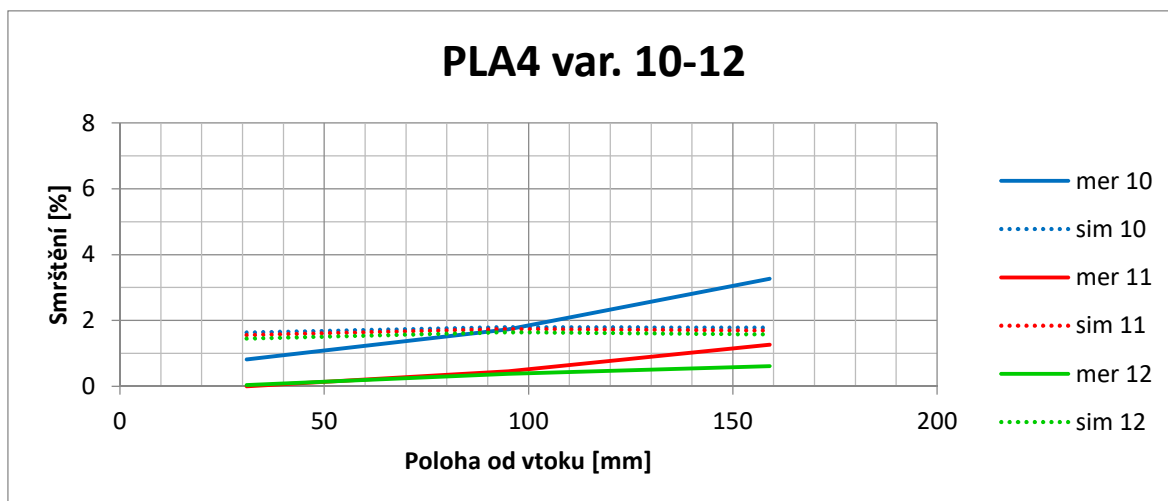


N.B. Information contained in this data-sheet is given in good faith and to the best of the knowledge and belief of Synbra Technology bv (The Company) is accurate. The properties of plastics set out herein are typical values and do not constitute a specification. It is at all times the responsibility of the customer to ensure that materials supplied by the Company are suitable for the purpose for which they are intended. The Company accepts no liability whatsoever arising out of the use of the information herein contained or the use, application, adaptation or processing of the products herein described.

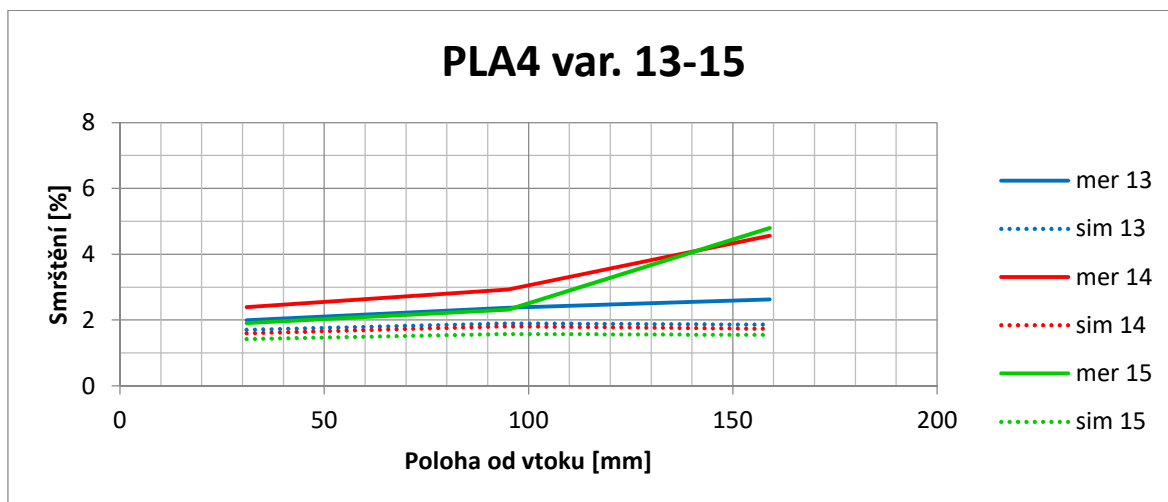
P3 – Průběhy smrštění a tlaků u PLA a PLLA



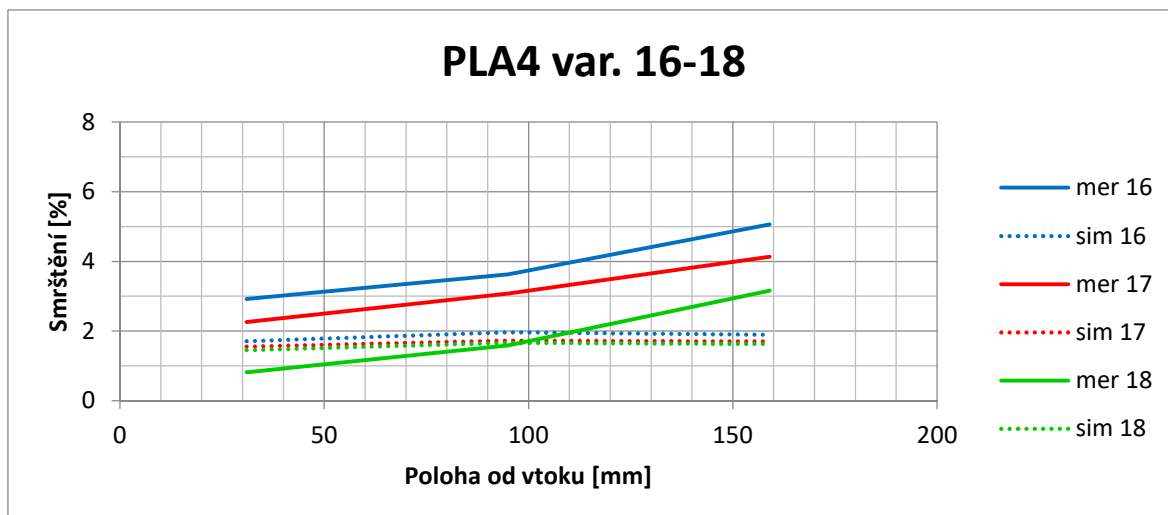
Obr. 52 Porovnání smrštění materiálu PLA 2 mm – varianta 7-9 mezi měřením a simulací



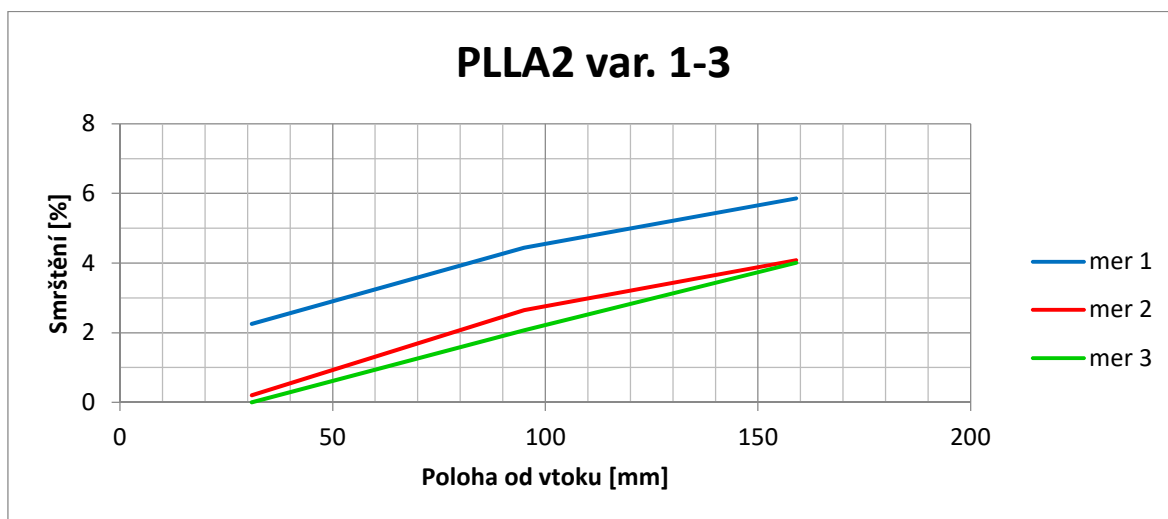
Obr. 53 Porovnání smrštění materiálu PLA 4 mm – varianta 10-12 mezi měřením a simulací



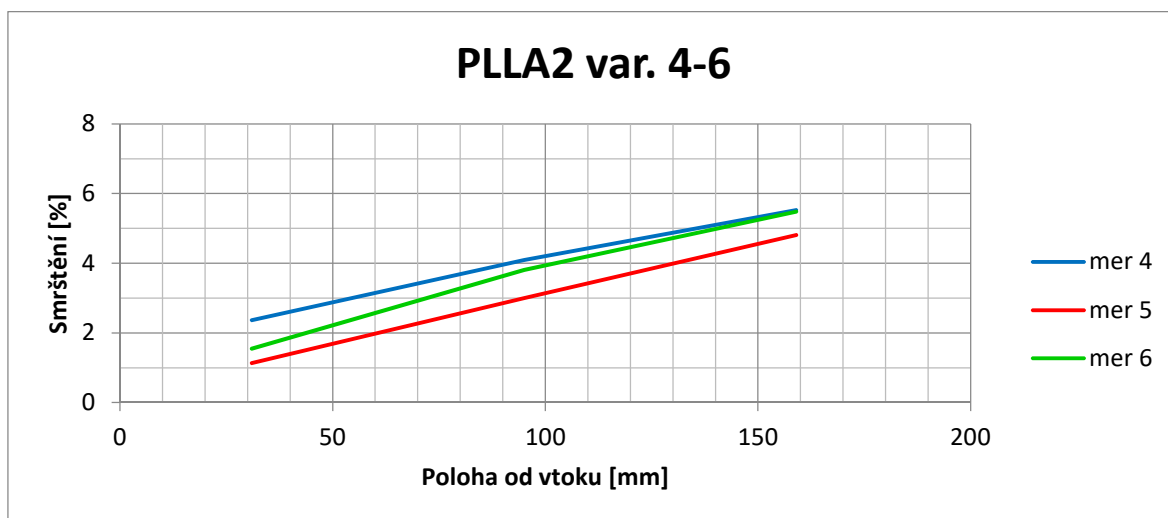
Obr. 54 Porovnání smrštění materiálu PLA 4 mm – varianta 13-15 mezi měřením a simulací



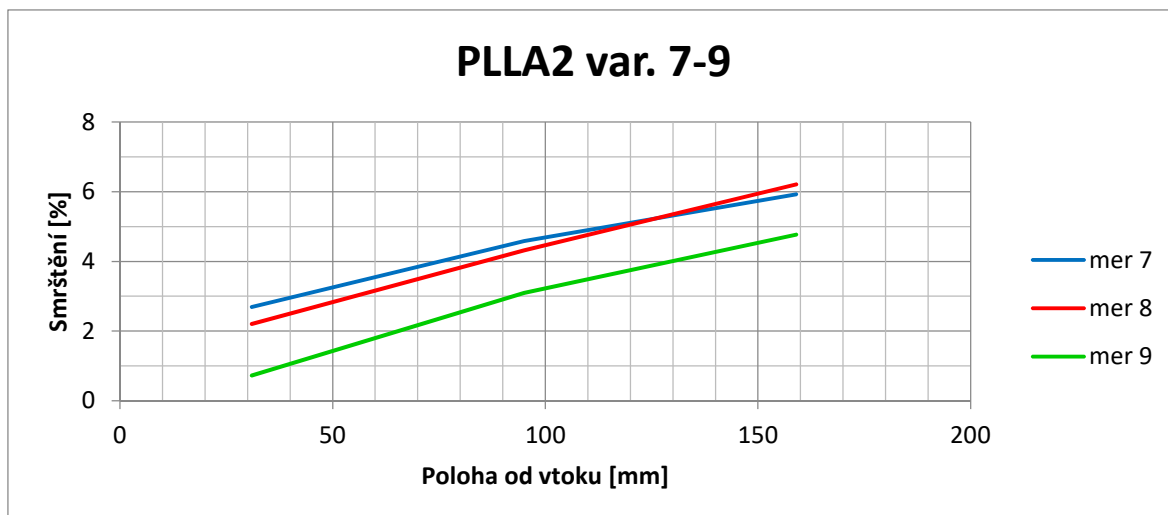
Obr. 55 Porovnání smrštění materiálu PLA 4 mm – varianta 16-18 mezi měřením a simulací



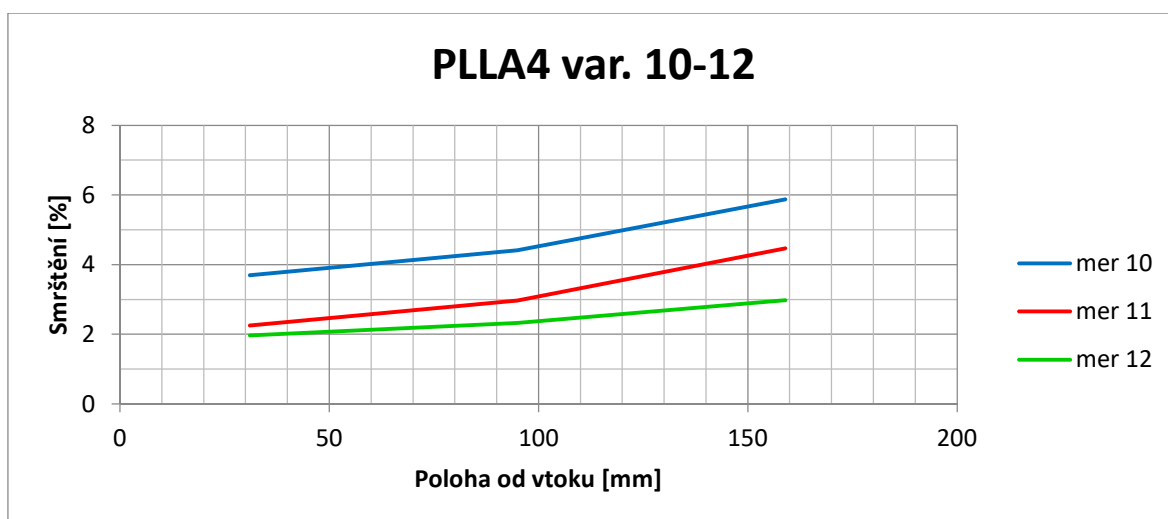
Obr. 56 Smrštění materiálu PLLA 2 mm – varianta 1-3 (měření)



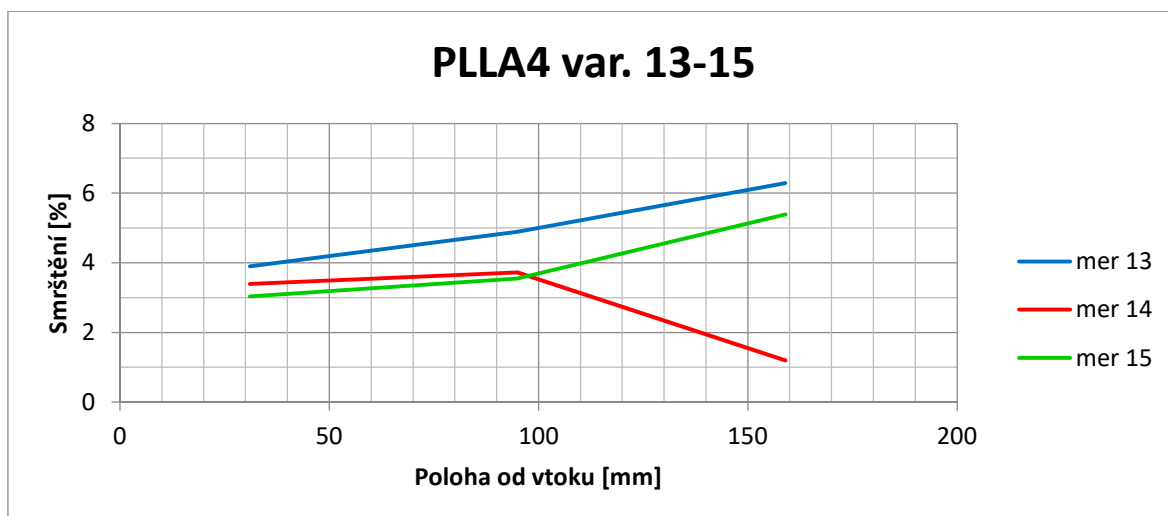
Obr. 57 Smrštění materiálu PLLA 2 mm – varianta 4-6 (měření)



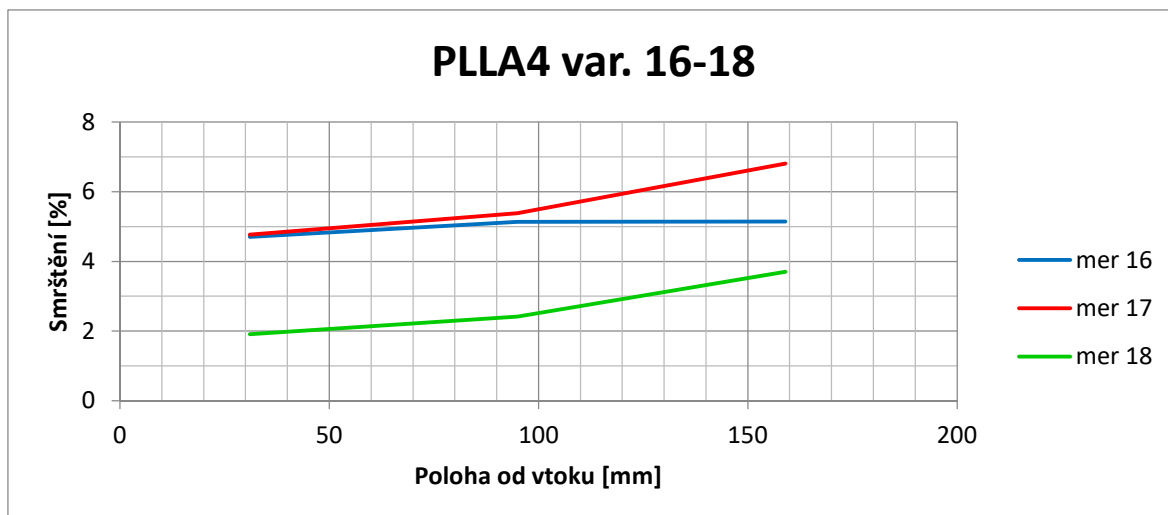
Obr. 58 Smrštění materiálu PLLA 2 mm – varianta 7-9 (měření)



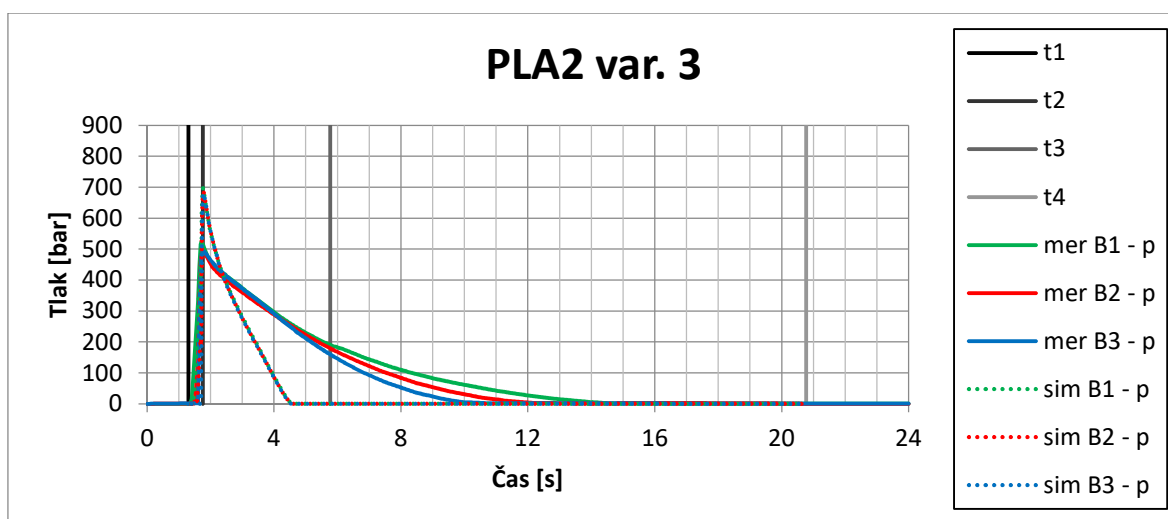
Obr. 59 Smrštění materiálu PLLA 4 mm – varianta 10-12 (měření)



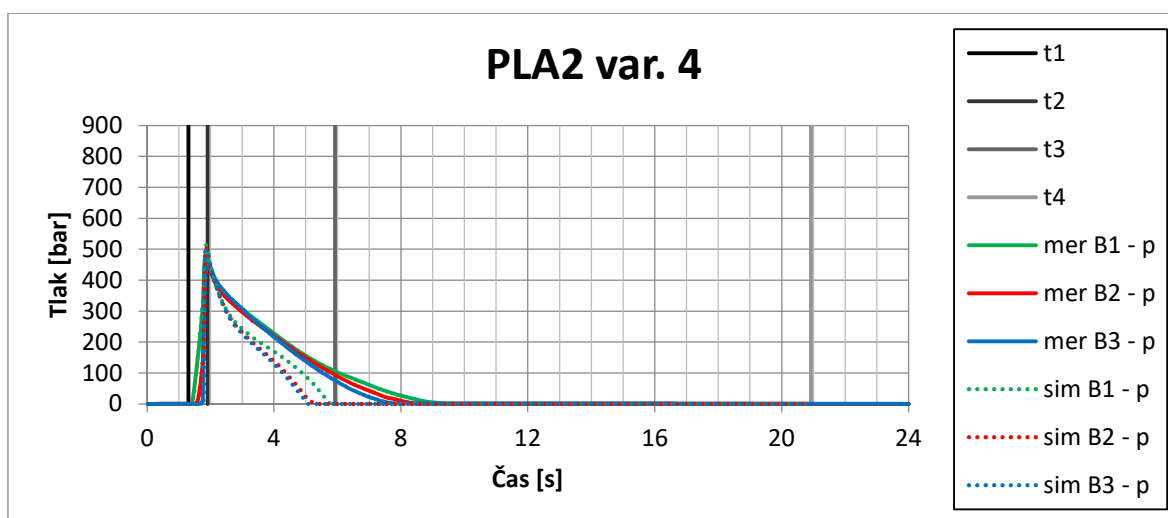
Obr. 60 Smrštění materiálu PLLA 4 mm – varianta 13-15 (měření)



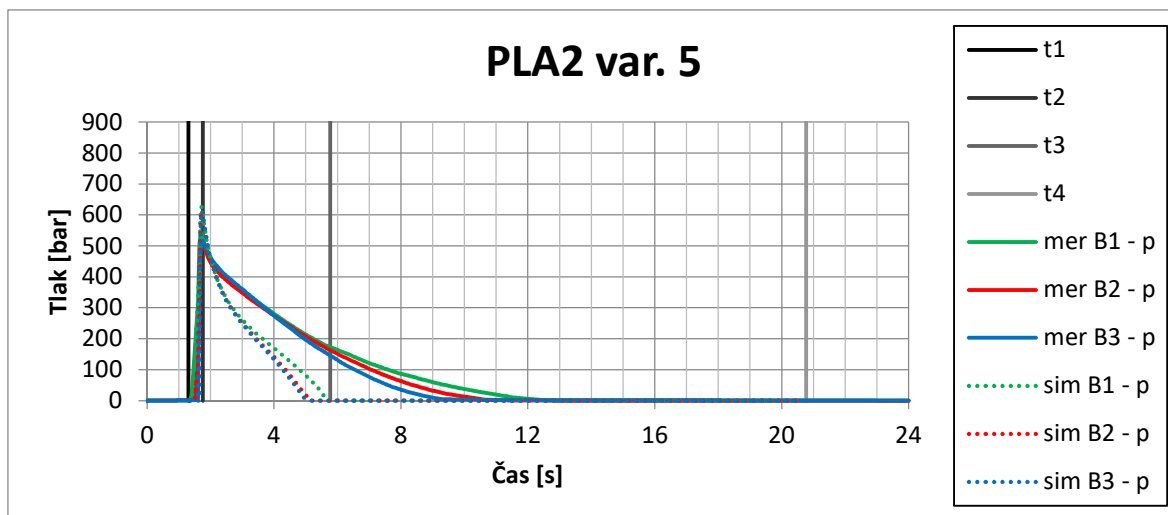
Obr. 61 Smrštění materiálu PLLA 4 mm – varianta 16-18 (měření)



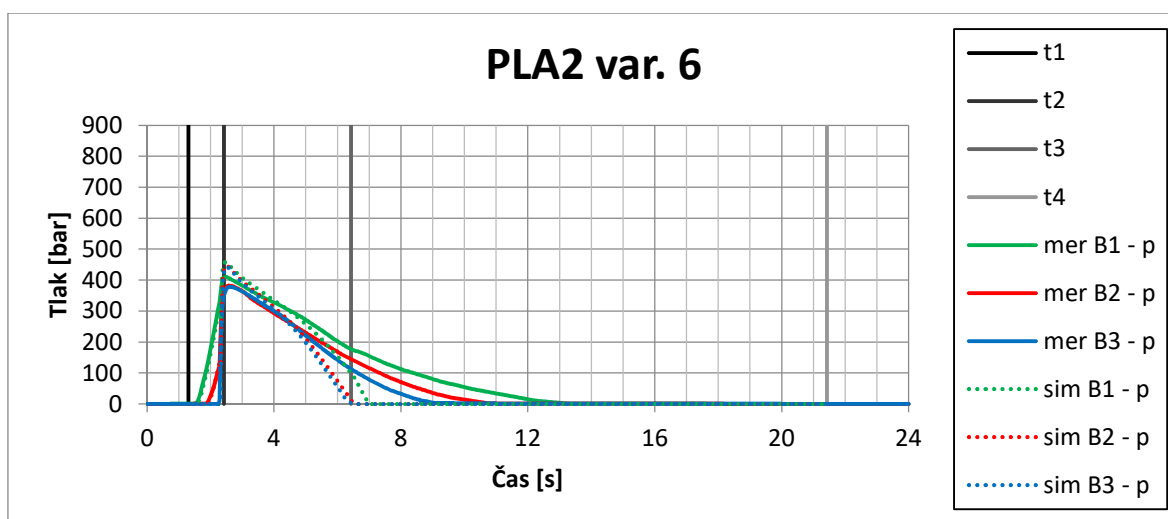
Obr. 62 Průběh tlaku materiálu PLA 2 mm - varianta 3



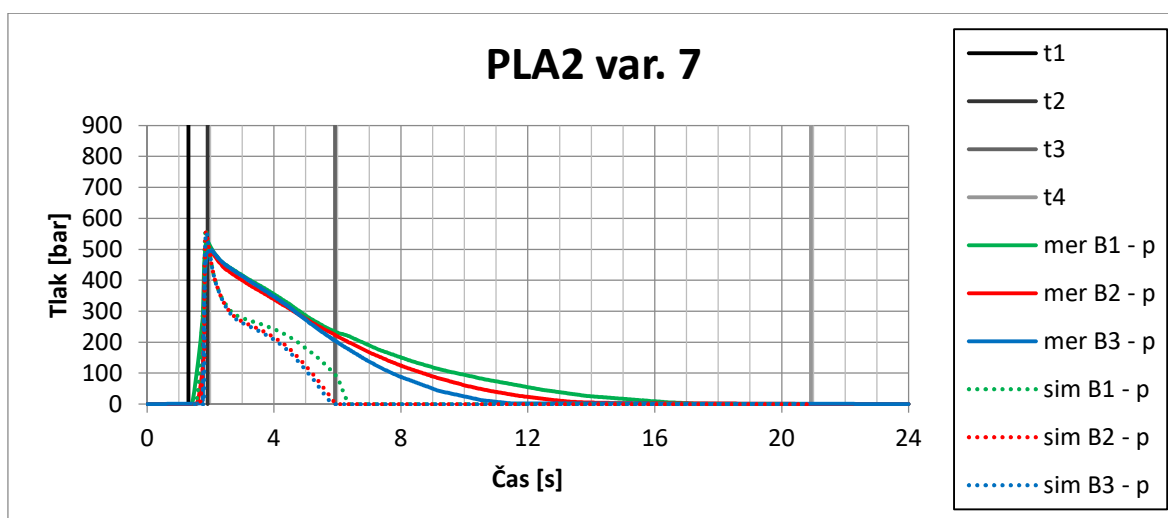
Obr. 63 Průběh tlaku materiálu PLA 2 mm - varianta 4



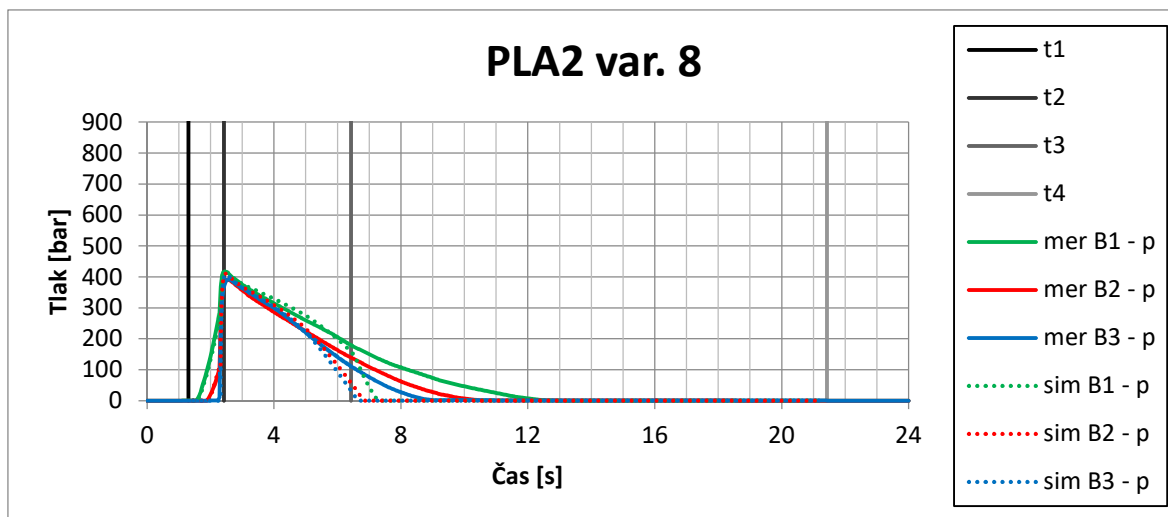
Obr. 64 Průběh tlaku materiálu PLA 2 mm - varianta 5



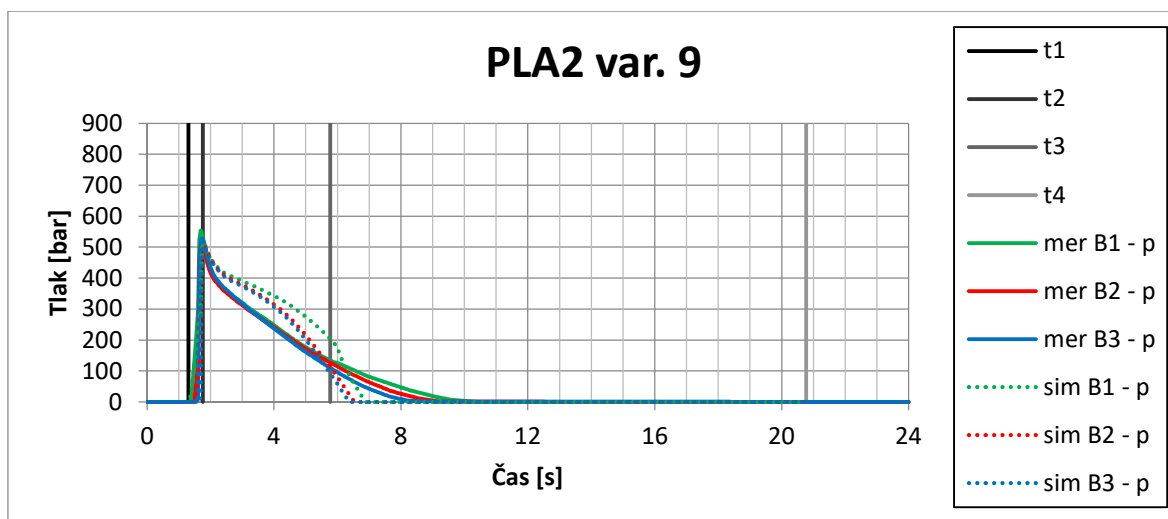
Obr. 65 Průběh tlaku materiálu PLA 2 mm - varianta 6



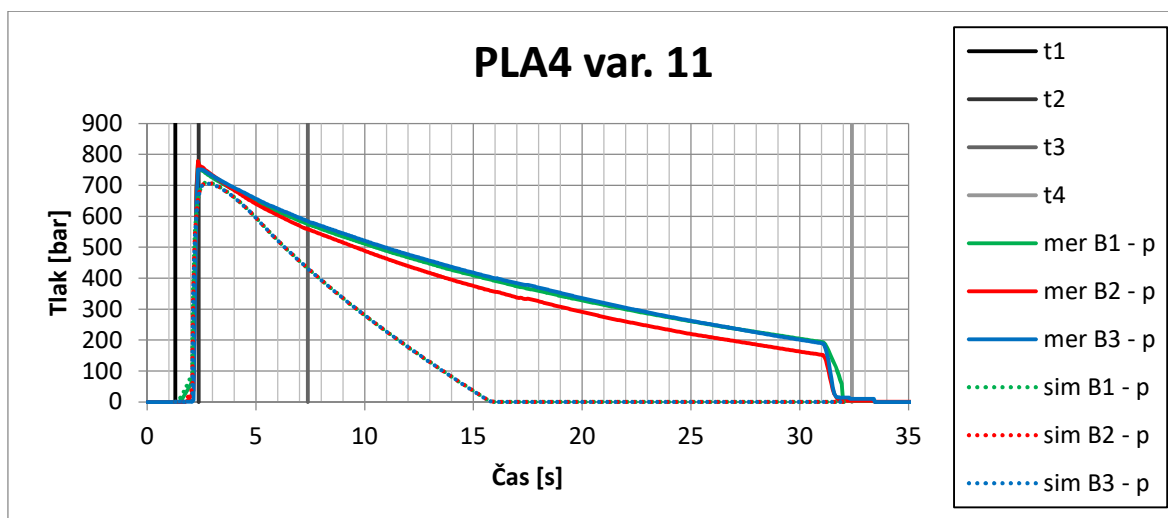
Obr. 66 Průběh tlaku materiálu PLA 2 mm - varianta 7



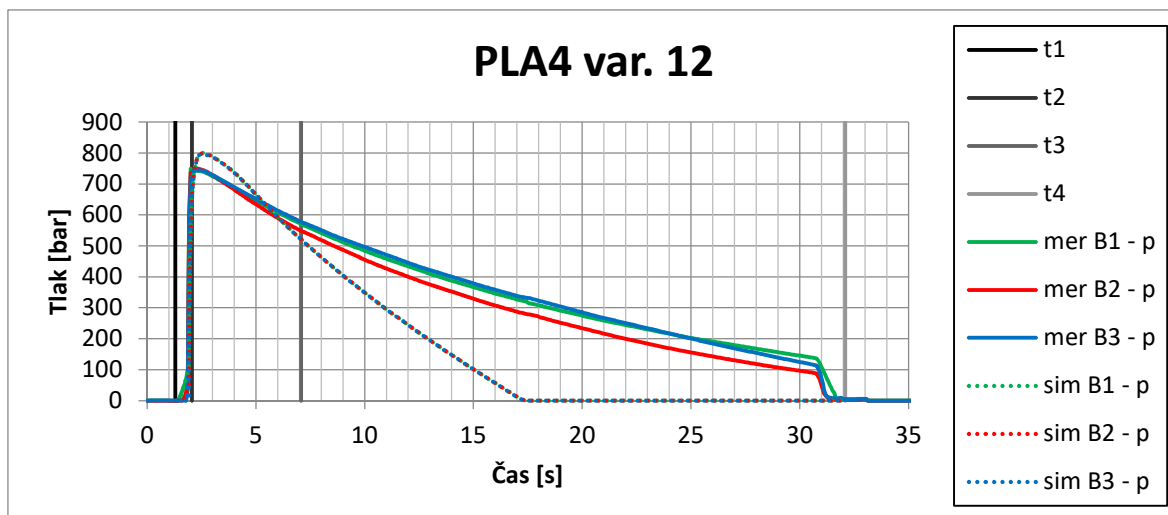
Obr. 67 Průběh tlaku materiálu PLA 2 mm - varianta 8



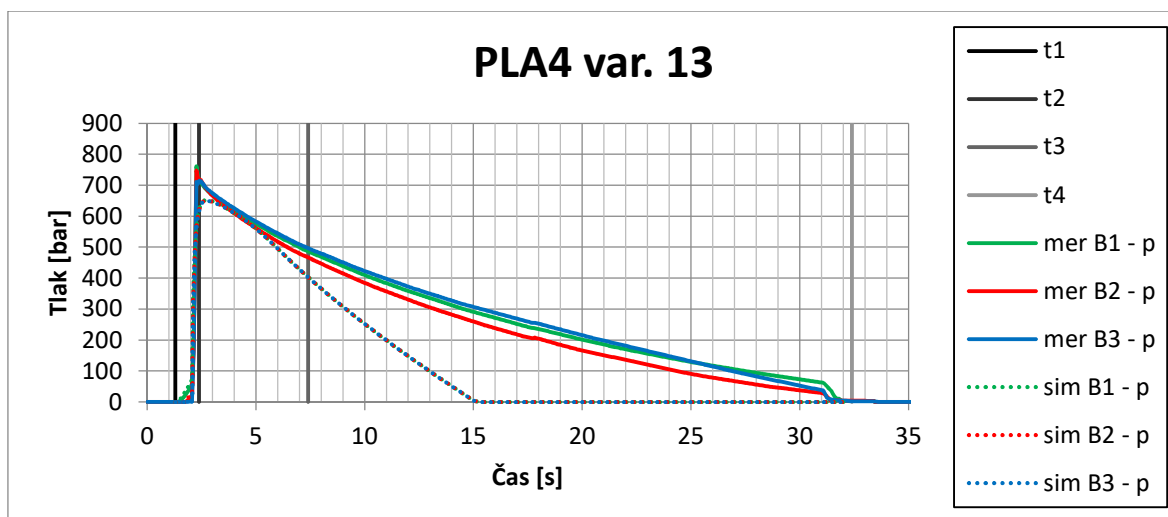
Obr. 68 Průběh tlaku materiálu PLA 2 mm - varianta 9



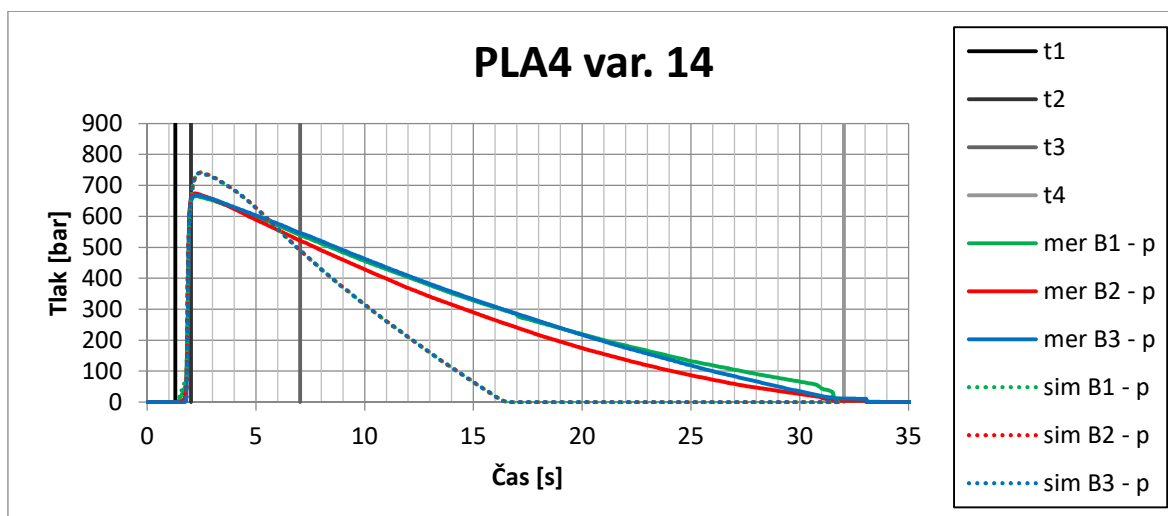
Obr. 69 Průběh tlaku materiálu PLA 4 mm - varianta 11



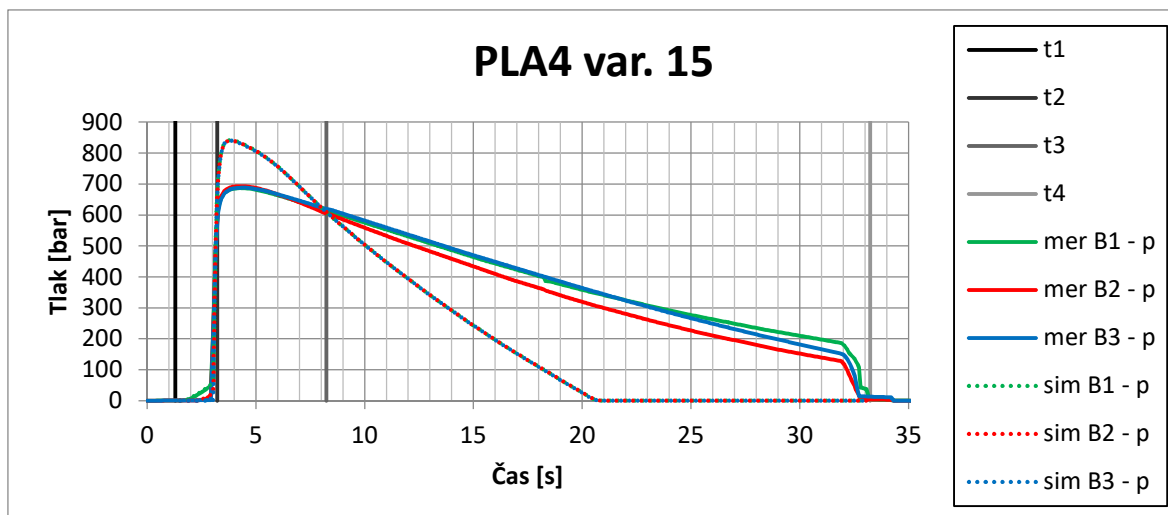
Obr. 70 Průběh tlaku materiálu PLA 4 mm - varianta 12



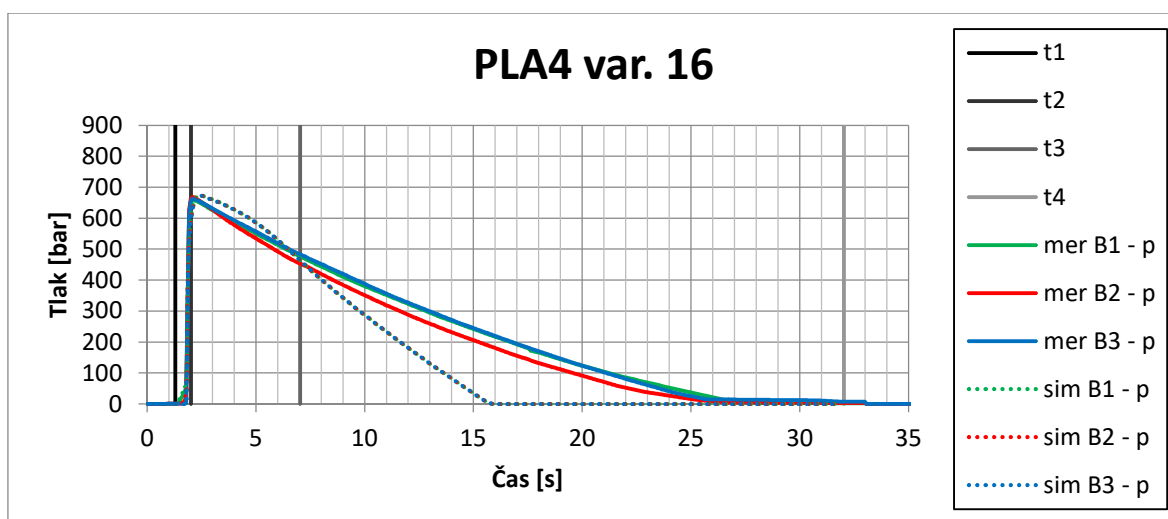
Obr. 71 Průběh tlaku materiálu PLA 4 mm - varianta 13



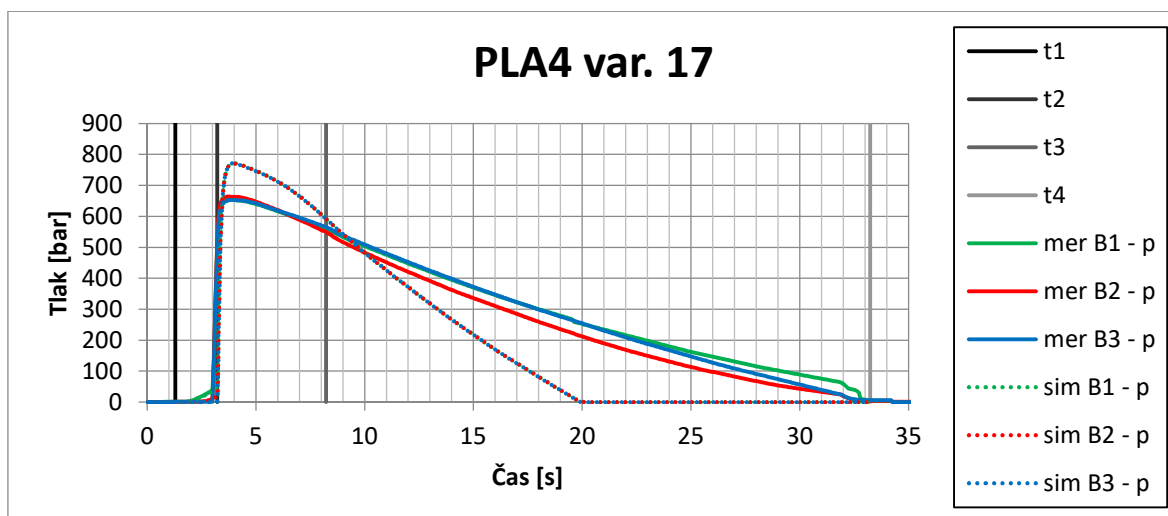
Obr. 72 Průběh tlaku materiálu PLA 4 mm - varianta 14



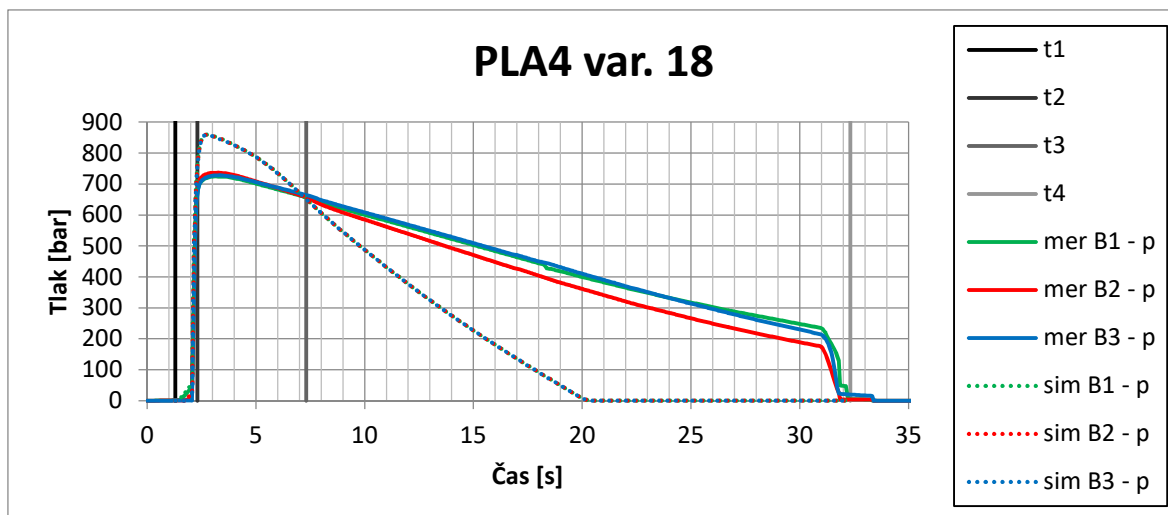
Obr. 73 Průběh tlaku materiálu PLA 4 mm - varianta 15



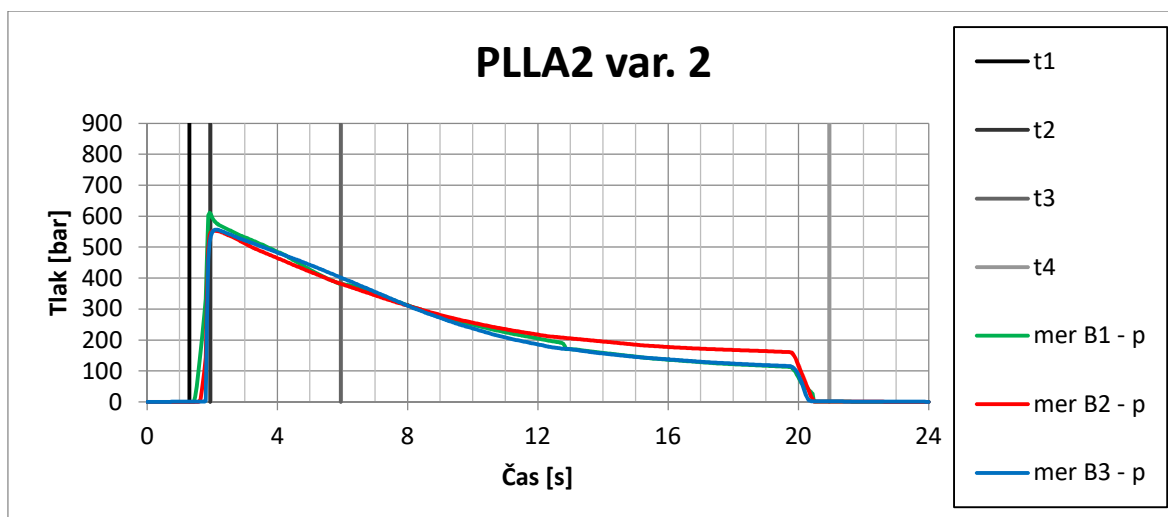
Obr. 74 Průběh tlaku materiálu PLA 4 mm - varianta 16



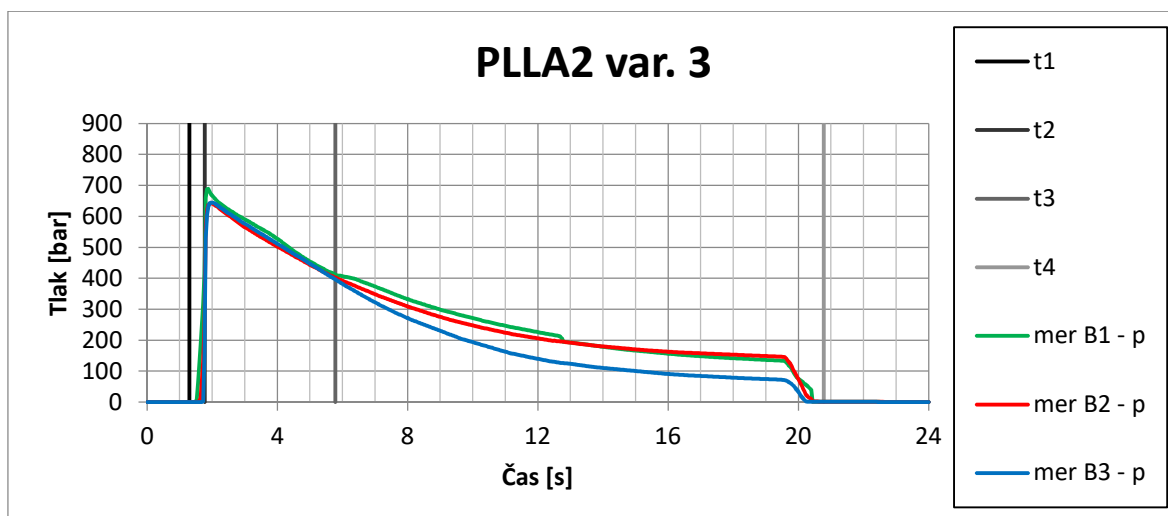
Obr. 75 Průběh tlaku materiálu PLA 4 mm - varianta 17



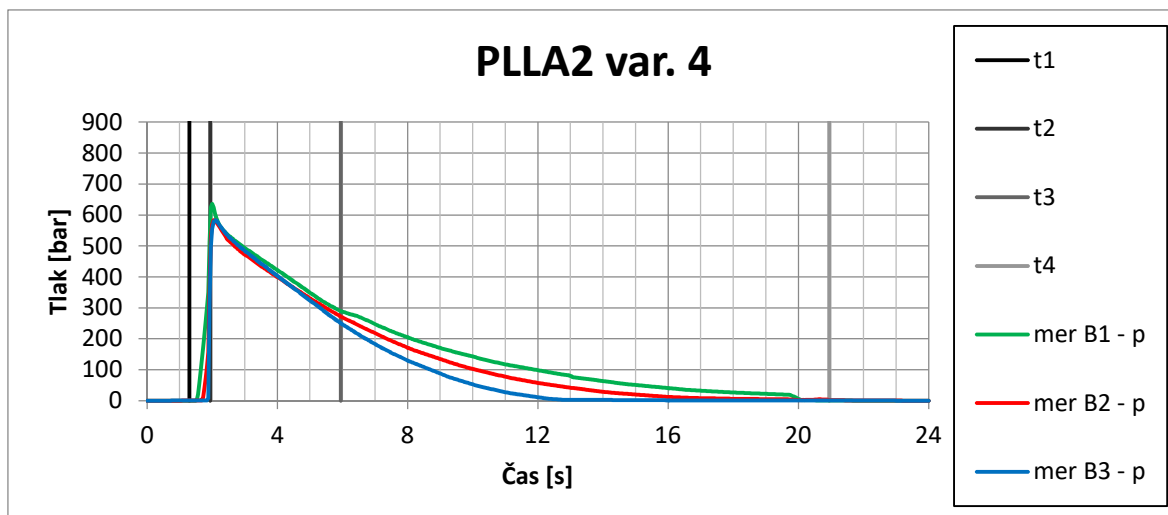
Obr. 76 Průběh tlaku materiálu PLA 4 mm - varianta 18



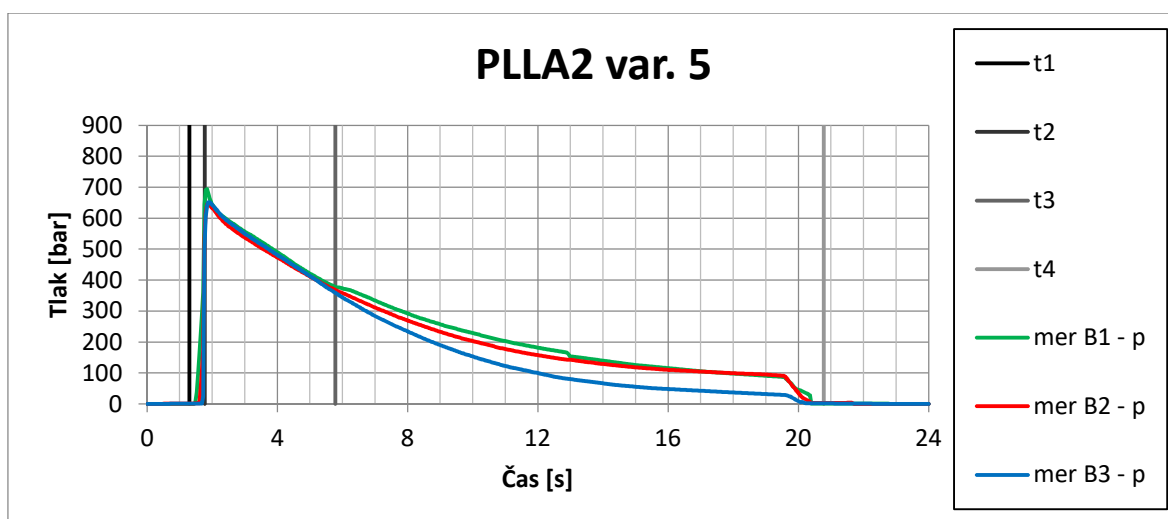
Obr. 77 Průběh tlaku materiálu PLLA 2 mm - varianta 2



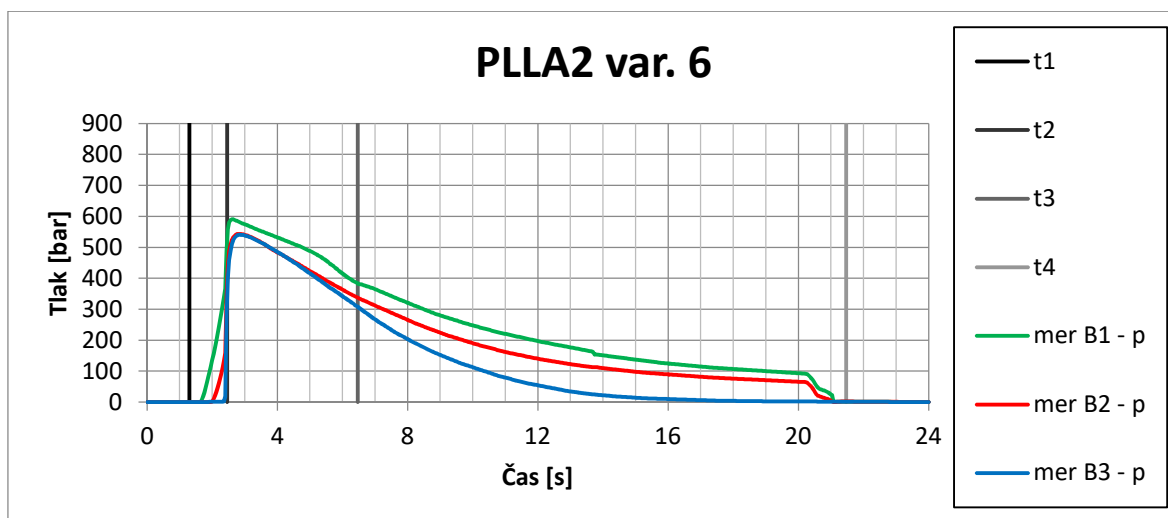
Obr. 78 Průběh tlaku materiálu PLLA 2 mm - varianta 3



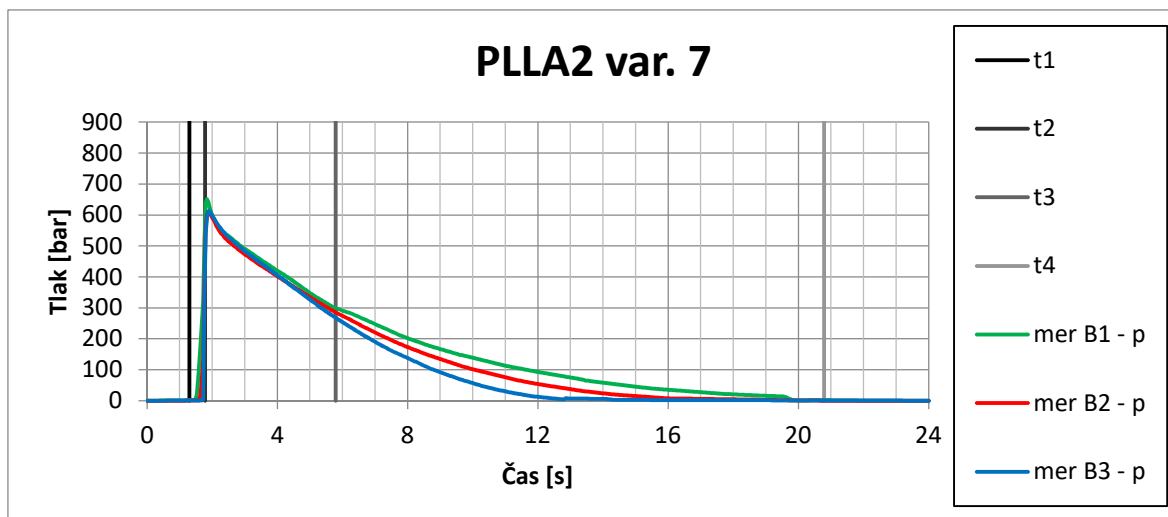
Obr. 79 Průběh tlaku materiálu PLLA 2 mm - varianta 4



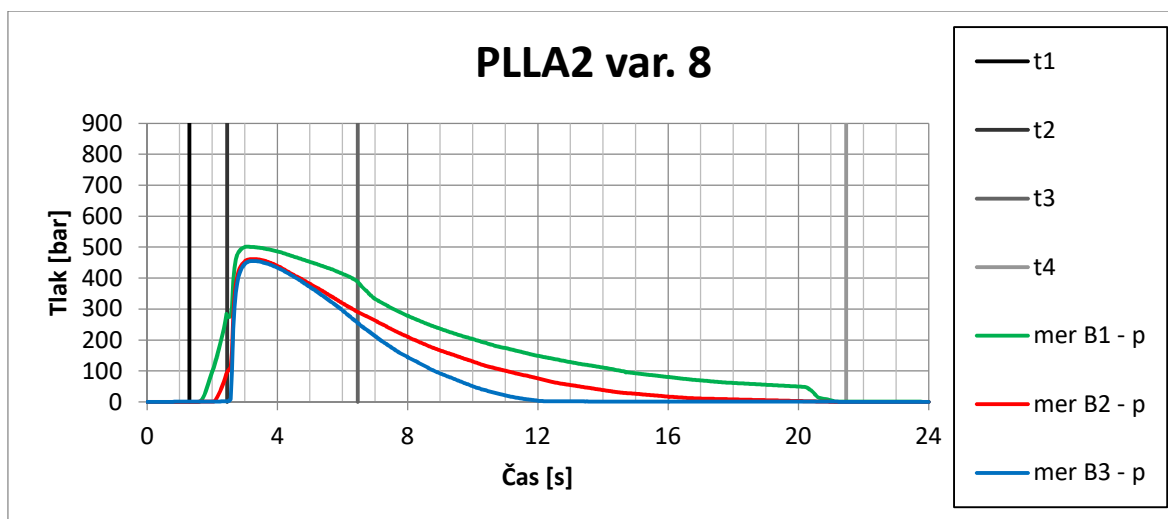
Obr. 80 Průběh tlaku materiálu PLLA 2 mm - varianta 5



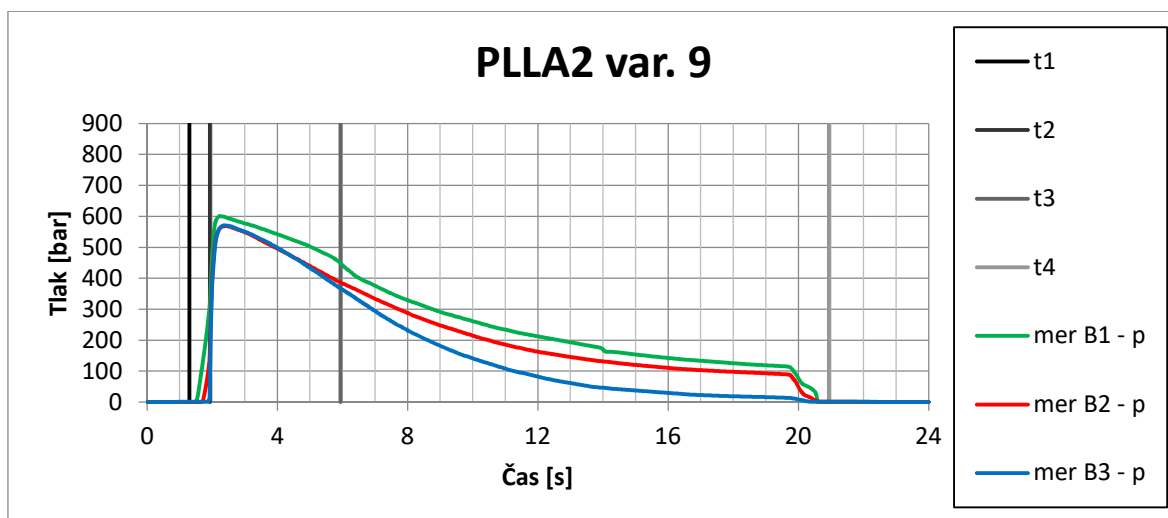
Obr. 81 Průběh tlaku materiálu PLLA 2 mm - varianta 6



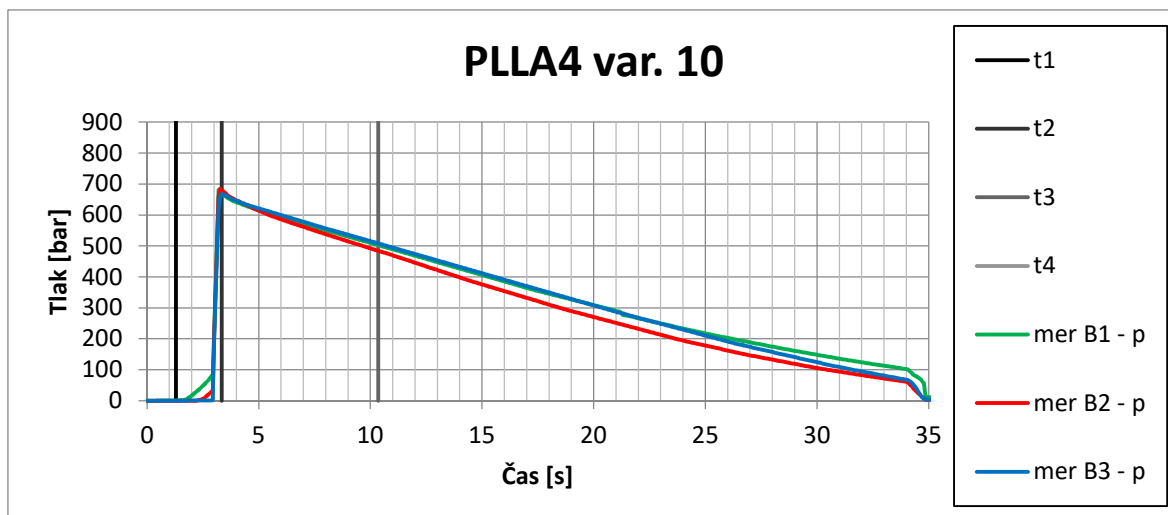
Obr. 82 Průběh tlaku materiálu PLLA 2 mm - varianta 7



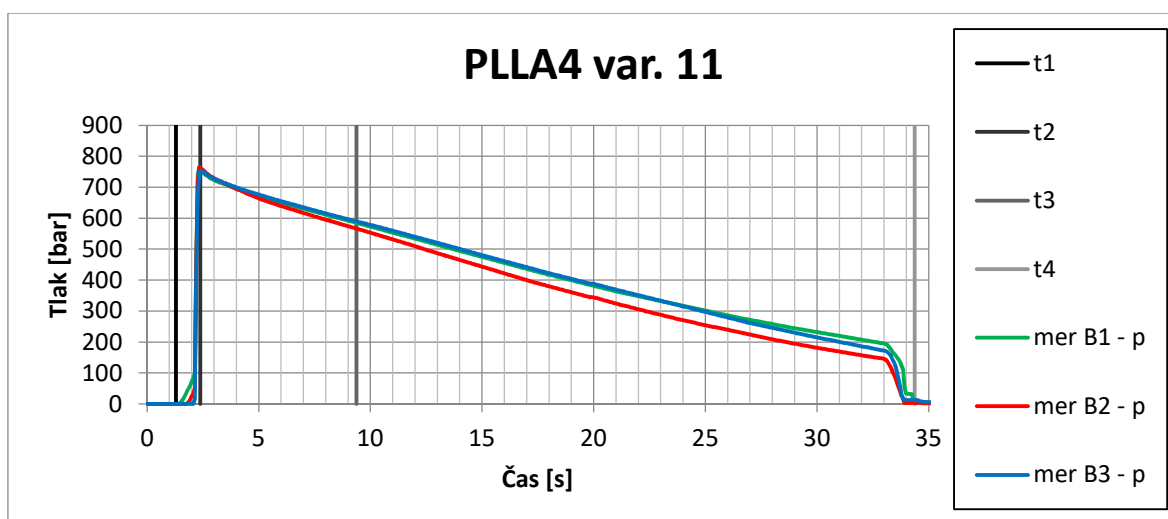
Obr. 83 Průběh tlaku materiálu PLLA 2 mm - varianta 8



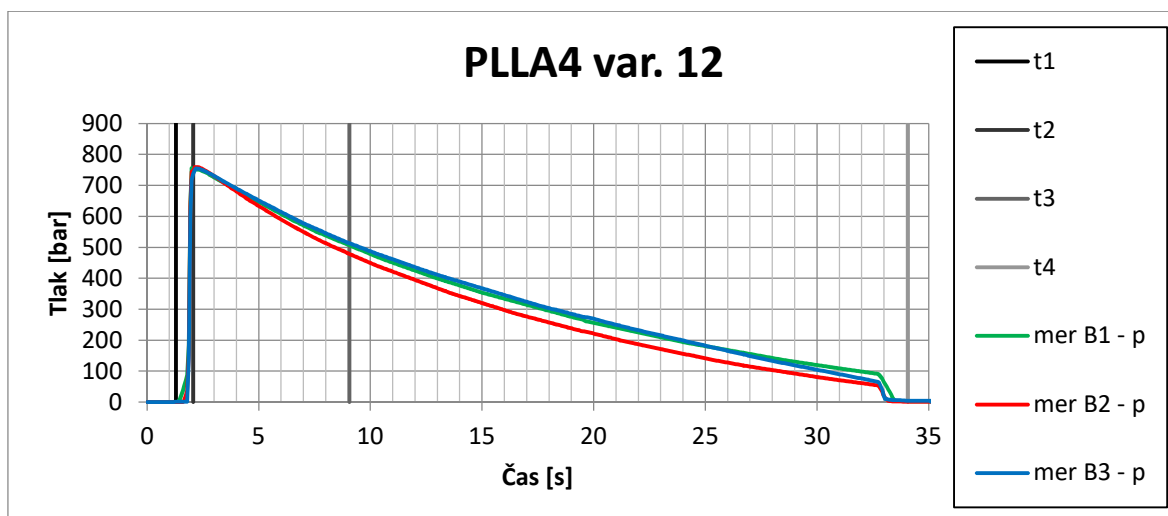
Obr. 84 Průběh tlaku materiálu PLLA 2 mm - varianta 9



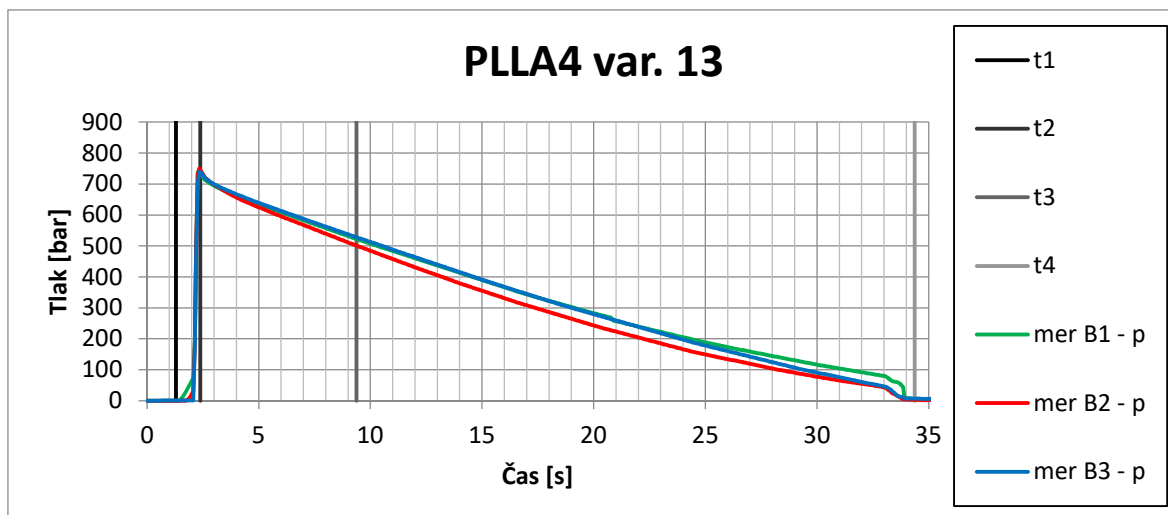
Obr. 85 Průběh tlaku materiálu PLLA 4 mm - varianta 10



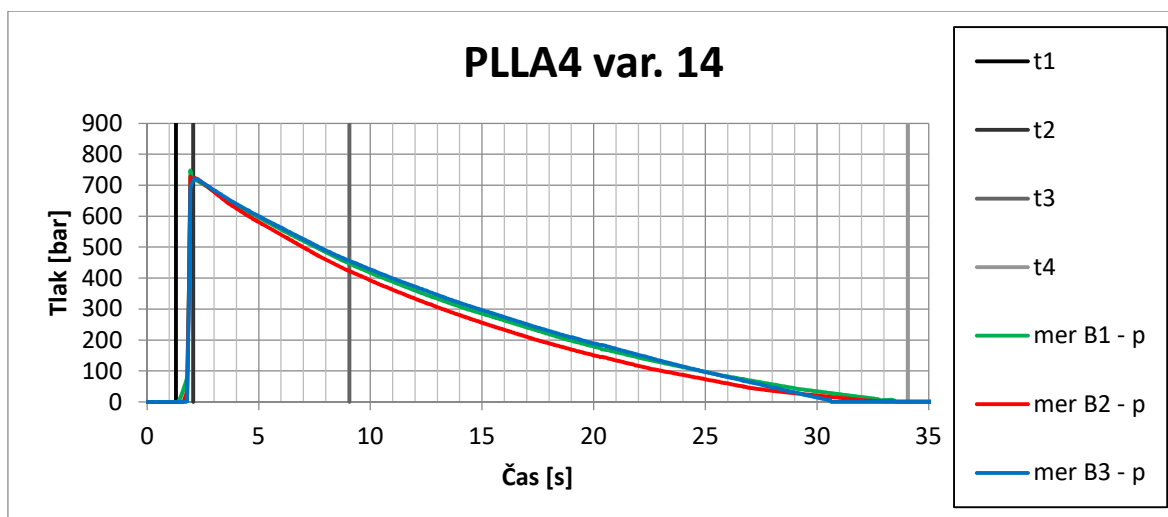
Obr. 86 Průběh tlaku materiálu PLLA 4 mm - varianta 11



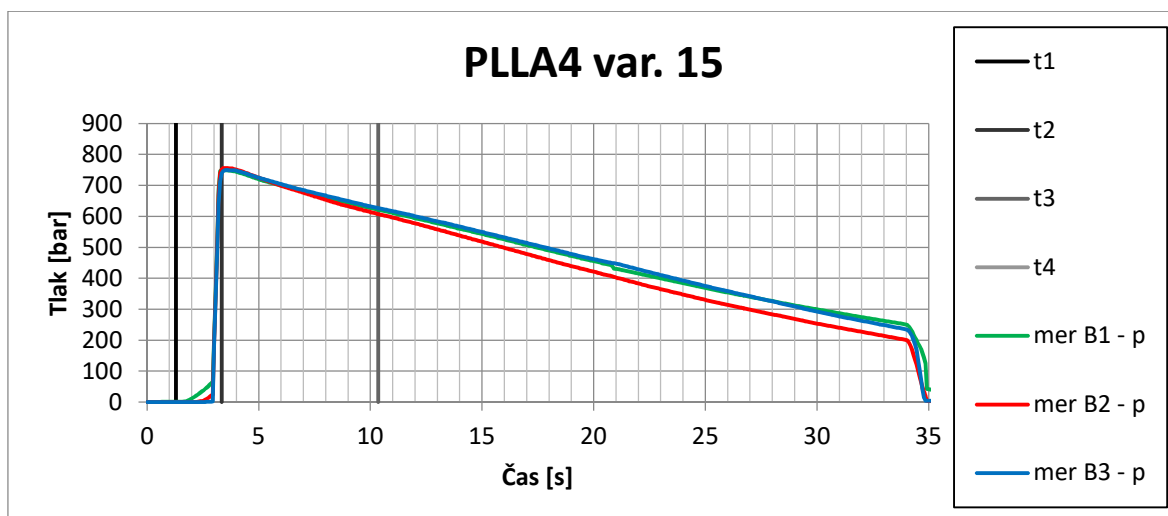
Obr. 87 Průběh tlaku materiálu PLLA 4 mm - varianta 12



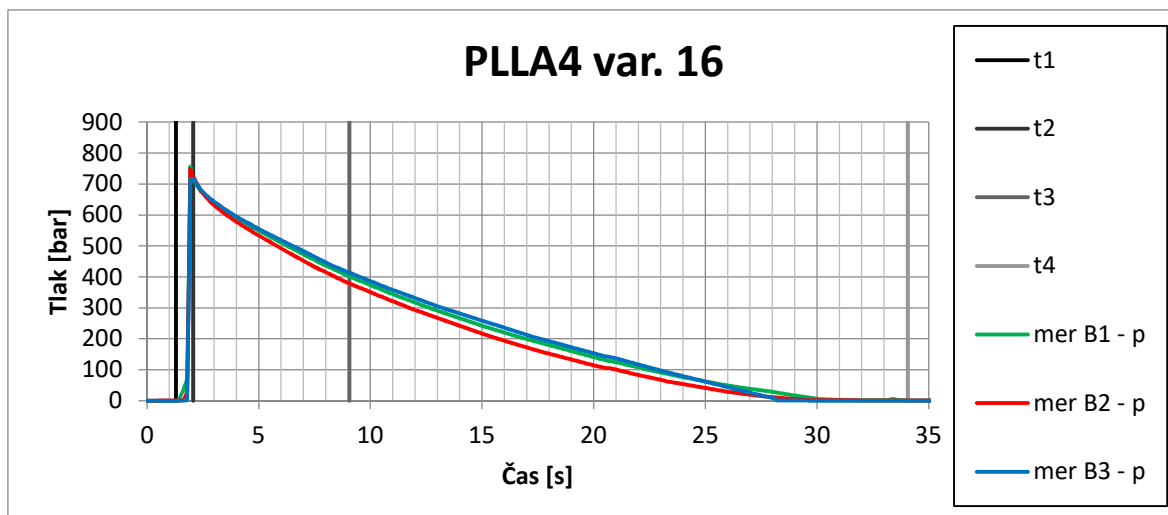
Obr. 88 Průběh tlaku materiálu PLLA 4 mm - varianta 13



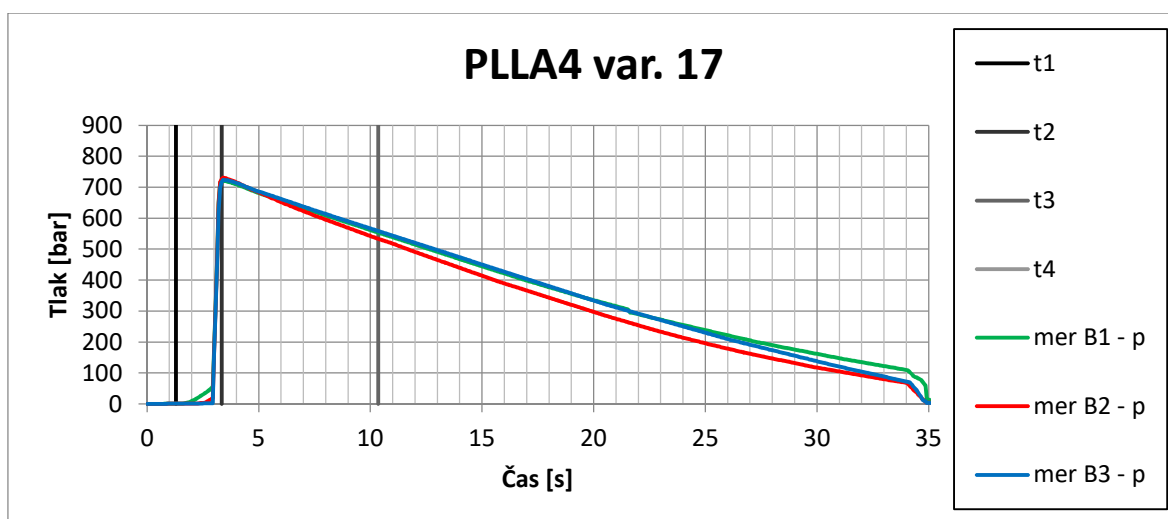
Obr. 89 Průběh tlaku materiálu PLLA 4 mm - varianta 14



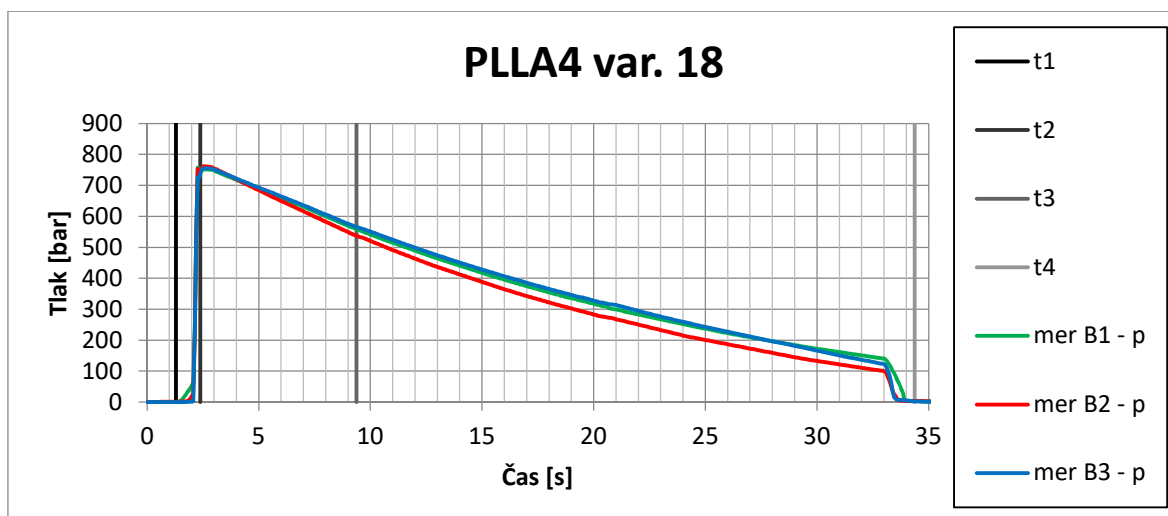
Obr. 90 Průběh tlaku materiálu PLLA 4 mm - varianta 15



Obr. 91 Průběh tlaku materiálu PLLA 4 mm - varianta 16



Obr. 92 Průběh tlaku materiálu PLLA 4 mm - varianta 17



Obr. 93 Průběh tlaku materiálu PLLA 4 mm – varianta 18